

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE
COSTEIRA ASSOCIADA A GALGAMENTOS
OCEÂNICOS**

João Miguel Ferreira Hermínio

Dissertação

MESTRADO EM GEOLOGIA DO AMBIENTE,
RISCOS GEOLÓGICOS E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE
COSTEIRA ASSOCIADA A GALGAMENTOS
OCEÂNICOS**

João Miguel Ferreira Hermínio

Orientado pelo Professor Doutor Rui Pires de Matos Taborda

Dissertação

**MESTRADO EM GEOLOGIA DO AMBIENTE,
RISCOS GEOLÓGICOS E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

2015

Agradecimentos

A realização deste trabalho representou um grande desafio que me fez crescer e aprender, melhorando as minhas competências. Quero deixar uma palavra de agradecimento a todos os que estiveram presentes comigo neste percurso.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais que sempre fizeram tudo para que isto fosse possível, obrigado por todo apoio e compreensão demonstrados em todos os momentos. À minha namorada, Mafalda, pelo constante incentivo, amor e força que me transmitiu sempre, e à sua família que também me transmitiu muita confiança.

Um agradecimento especial ao professor Rui Taborda, por toda a dedicação e orientação prestada ao longo desta caminhada. Quero agradecer também a um grupo de pessoas da FCUL que me ajudaram e incentivaram sempre, sem as quais teria sido mais difícil, passo a citar: Ana Bastos, Cristina Lira, João Dias, Mafalda Carapuço, Mónica Ribeiro, Tanya Silveira e Umberto.

Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos, através da aplicação de modelos de previsão analíticos e apoiar a cartografia das zonas ameaçadas pelo mar (ZAM). Neste contexto procedeu-se à revisão de conceitos relacionados com a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos e à descrição de modelos analíticos para estimar a cota máxima de espraio. Para aplicar e validar esses modelos, fez-se a recolha de dados topográficos e oceanográficos, sendo posteriormente analisados os seguintes parâmetros: altura e período das ondas (incluindo as componentes gravítica e infragravítica), limite do espraio e o declive da praia. Os resultados dos modelos de galgamento foram confrontados com dados recolhidos na sequência da tempestade *Christina*.

A determinação dos valores a utilizar na cartografia das ZAM, na praia da Foz do Lizandro e na praia das Maças, baseou-se numa série de agitação longa (35 anos) e nos modelos de espraio que apresentaram melhor desempenho na fase de validação. Foi desenvolvido um método holístico para a determinação e cartografia do alcance máximo do espraio, que considera não só a condicionante morfológica mas também as condicionantes hidrodinâmicas. A cota e distância de máximo espraio foram determinadas para uma tempestade de referência e para os horizontes temporais de 2050 e 2100, a partir do somatório de quatro fatores condicionantes: o espraio das ondas, a maré astronómica, a sobre-elevação meteorológica e a subida do nível médio do mar para cada cenário.

Abstract

The present dissertation aims to the evaluation of the coastal vulnerability associated to the oceanic overtopping, through the application of prevision analytical models and support the cartography of zones threatened by the sea. In this context we proceed in the revision of the concepts related to the coastal vulnerability associated to the oceanic overtopping and the description of analytical models to estimate the maximum elevation of the swash. To evaluate and validate these models, we had done a gathering of topographic and oceanographic data, being further analyzed the following parameters: height, wave period (including the gravity and infragravity components), swash limit and wave slope. The results of the overtopping models were faced with data obtained in the sequence of the *Christina* storm.

The determination of the values used in the vulnerability cartography, in the Foz do Lizandro beach and Maçãs beach, were based on series of long wave agitation (35 years) and swash models that represented better performance in the validation phase. It developed a holistic method for determining and mapping the maximum range of spreadeth abroad, which considers not only the morphological condition but also the hydrodynamic conditions. The elevation and the maximum spread distance were determinate to a reference storm and for horizontal timing between 2050 and 2100, from a sum of four conditioning factors: swash, astronomic tide, storm surge and the rise of the medium level of the sea for each scenery.

Índice

1. Introdução	1
2. Estado Atual dos Conhecimentos	3
2.1 Conceitos	3
2.2 Modelos analíticos	5
3. Áreas de estudo.....	11
4. Métodos	13
4.1 Modelo Concetual.....	13
4.1.1 Máximo Espraio	13
4.1.2 Nível do Mar	14
4.1.3 Topografia	14
4.1.4 Fórmula de <i>run-up</i>	14
4.1.4.1 Cálculo dos parâmetros das ondas.....	15
4.1.4.2 Cálculo do declive	16
Metodologia restrita.....	16
Metodologia holística	16
4.2 Cartografia das ZAM.....	18
4.3 Calibração e validação	20
4.3.1 Seleção e calibração fórmula de <i>run-up</i>	20
3.3.1.1 Condições de baixa energia	20
3.3.1.2 Tempestade Christina	26
4.3.2 Validação do Modelo de espraio.....	27
5. Resultados.....	28
5.1 Caracterização da agitação marítima em condições de tempestade extrema.....	28
5.2 Escolha da fórmula de <i>run-up</i>	31
5.2.1 Praia Grande.....	31
5.2.2 Praia da Foz do Lizandro	35
5.2.3 Aplicação às condições de baixa energia	37
5.2.4 Aplicação à tempestade <i>Christina</i>	40
5.3 Validação do modelo de espraio	42
5.4 Cartografia das ZAM.....	47
5.4.1 Foz do Lizandro	49
5.4.2 Praia das Maças.....	50

6. Considerações finais	51
7. Referências bibliográficas	54
8. Anexos	57
8.1 Anexo A	57
8.2 Anexo B	58
8.3 Anexo C	59

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema representativo das diversas componentes das ondas.	3
Figura 2 – Nomenclatura das diferentes divisões da praia. Fonte: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html	4
Figura 3 – A) run-up subestimado; B) run-up sobrestimado.....	10
Figura 4 – Enquadramento geográfico dos três locais de estudo. A) praia da Foz do Lizandro; B) praia das Maças; C)praia Grande.	12
Figura 5 – Esquema do procedimento de aplicação do modelo concetual.....	13
Figura 6 – Esquema do cálculo do máximo espraio.....	14
Figura 7 - Esquematisação do cálculo do declive para cada intervalo de 10 centímetros.	16
Figura 8 – Representação do alcance máximo do espraio (a laranja) e estimativa do run-up para cada intervalo de 10 cm (a tracejado).....	17
Figura 9 – Representação da ligação entre os pontos de alcance máximo dos espraos estimados.	19
Figura 10 – Levantamentos topográficos e localização dos aparelhos de recolha de dados na Praia Grande.....	21
Figura 11 – Levantamento topográfico da praia da Foz do Lizandro.	22
Figura 12 – Medição dos 100 espraos consecutivos na Foz do Lizandro pelas 11:20h.	22
Figura 13- Imagens dos aparelhos de recolha de dados oceanográficos: A) PT_72; B) mini-ADP emerso; C) PT_70; D) mini-ADP submerso.	23
Figura 14 – Cálculo da altura da onda pelo método de Bascom.	24
Figura 15 – Imagem original captada pela câmara de vídeo.	25
Figura 16 – A) Matriz de transferência para a praia das Maças; B)em xx o rumo das ondas e em yy a razão entre altura de cada onda junto à costa e altura da onda ao largo (a preto) e a razão entre a altura de cada onda na rebentação e altura da onda ao largo (a azul).....	28
Figura 17 – A) Matriz de transferência para a praia da Foz do Lizandro; B)em xx o rumo das ondas e em yy a razão entre altura de cada onda junto à costa e altura da onda ao largo (a preto) e a razão entre a altura de cada onda na rebentação e altura da onda ao largo (a azul).....	29
Figura 18 - Ondas ao largo não refratadas para a praia das Maças.	29
Figura 19 - Ondas ao largo não refratadas para a praia da Foz do Lizandro.....	30
Figura 20 – Perfis da praia Grande de norte para sul.	31
Figura 21 – Registo de dados oceanográficos no mini-ADP entre as 10:30h e as 18:15h.	32
Figura 22 - Representação gráfica dos espraos medidos na praia Grande entre as 16:28h e as 16:40h.....	33
Figura 23 – Timestack gerada entre as 16:30h e as 16:40h a partir da sequência de imagens ortoretificadas.	33
Figura 24 – A) Marcação dos espraos na timestack; B) Representação gráfica dos espraos.	34
Figura 25 – A) xx intervalos de 10 minutos, e yy relação entre altura significativa da onda infragravítica e a altura significativa da onda gravítica; B) xx profundidade, e yy relação entre altura significativa da onda infragravítica e a altura significativa da onda gravítica.	35
Figura 26 – perfis da praia da Foz do Lizandro de norte para sul.	36
Figura 27 - Representação gráfica dos espraos medidos na Foz do Lizandro.	37
Figura 28 – Comparação dos valores de run-up estimados por cada modelo para a praia Grande em condições médias de agitação marítima.	39
Figura 29 - Comparação dos valores de run-up estimados por cada modelo para a praia da Foz do Lizandro em condições médias de agitação marítima.	39
Figura 30 – Comparação cartográfica entre os resultados obtidos por cada metodologia na praia da Foz do Lizandro.....	44

Figura 31 – Comparação cartográfica entre os resultados obtidos por cada metodologia na praia das Maças.....	45
Figura 32 – Cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos na praia da Foz do Lizandro.....	49
Figura 33 - Cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos na praia das Maças.....	50

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Síntese dos modelos analíticos estudados.	8
Tabela 2 – Previsão de marés para 4 de abril de 2014. http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html	24
Tabela 3 - Caracterização dos parâmetros da tempestade Christina nas praias monitorizadas pela ARH/Tejo (Pedras Negras (PN), Paredes de Vitória (PV), Nazaré (NZ), Pedras D’El Rei (PDR), Santa Cruz (SC), Fonte da Telha (FT) e Lagoa de Albufeira (LA)).	26
Tabela 4 – Características da agitação marítima para os período de retorno de 35 e 85 anos nas áreas de estudo.	30
Tabela 5 - Características das ondas registadas pelos transdutores entre as 16:28h e as 16:40h.	33
Tabela 6 – Agitação nos locais de estudo.....	38
Tabela 7 – Run-up estimado pelos modelos analíticos para as praias Grande e Foz do Lizandro.	38
Tabela 8 - Cálculo do run-up através dos modelos estudados para as diferentes praias monitorizadas.	40
Tabela 9 – Relação entre a fórmula de Stockdon et al. (2006) e a sua calibração Stockdon Modificada (2015).....	40
Tabela 10 – Comparação entre a fórmula de Stockdon et al. (2006) e a sua calibração Stockdon Modificada (2015) com os run-up’s medidos nas diferentes praias monitorizadas.	41
Tabela 11 – Comparação entre os resultados calculados pela fórmula otimizada e os run-up’s medidos nas diversas praias monitorizadas.	41
Tabela 12 – Determinação do erro médio quadrático (EMQ), erro médio absoluto (VIES), índice de concordância de Willmott (IC), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de confiança (C) para cada modelo.	42
Tabela 13 – Relação entre as cotas estimadas e medidas na praia da Foz do Lizandro.	43
Tabela 14 – Relação entre as cotas estimadas e medidas na praia das Mações.	43
Tabela 15 – Cotas estimadas por cada metodologia para a tempestade Christina na praia da Foz do Lizandro.	43
Tabela 16 – Cotas estimadas por cada metodologia para a tempestade Christina na praia das Mações.	43
Tabela 17 – Cálculo do alcance máximo dos espraços na praia da Foz do Lizandro para os cenários de eventos extremos apresentados.	47
Tabela 18 – C Cálculo do alcance máximo dos espraços na praia das Mações para os cenários de eventos extremos apresentados.	47

1. Introdução

A zona costeira de Portugal representa uma importante faixa do território nacional, onde se concentram três quartos da população portuguesa contribuindo para a geração de 85 por cento do produto interno bruto. Esta faixa necessita de ser preservada e valorizada devido aos seus valores ambientais, económicos, sociais, culturais e recreativos.

A atratividade intrínseca do litoral, e consequente aumento da procura para diferentes usos e ocupações, justifica o desenvolvimento de medidas específicas que fomentem o aproveitamento das suas potencialidades, designadamente através de um conjunto de ações de valorização dos seus recursos socioeconómicos, a par da proteção dos ecossistemas e valores naturais dos ambientes litorais, contribuindo, de uma forma geral, para a melhoria da qualidade de vida das populações (Pinto et al., 2012). Estas medidas devem ainda dar especial atenção aos aspetos relacionados com o risco costeiro que, em ambientes arenosos, traduz-se principalmente no risco de erosão, inundação e galgamento oceânico. O facto destas situações de risco não serem devidamente acauteladas pode originar elevados prejuízos como os que se verificaram na sequência da tempestade *Christina* em janeiro de 2014. Com efeito, segundo o relatório técnico elaborado pela Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA, I.P.), foram contabilizados cerca de 16.5 milhões de euros de prejuízos provocados pelo temporal em toda a extensão do litoral português.

O presente estudo enquadra-se num domínio multidisciplinar, direcionado para o ambiente, processos costeiros e ordenamento do território, pretendendo contribuir para a progressão e evolução do conhecimento científico sobre a vulnerabilidade costeira associada ao risco de galgamento oceânico.

Os principais objetivos desta dissertação consistem na avaliação da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos, através da análise e aplicação de modelos analíticos de previsão, e respetiva cartografia em ambiente SIG.

Para a concretização destes objetivos efetuou-se uma síntese bibliográfica sobre os processos associados ao galgamento oceânico e compilaram-se os modelos analíticos que permitem estimar esta grandeza. Seguiu-se a recolha dados de campo para estudar as várias componentes associadas ao galgamento oceânico e que são relevantes para a seleccionar e calibrar as fórmulas que estimam o alcance vertical do espraio.

De seguida desenvolveu-se um modelo concetual para a determinação do alcance vertical e horizontal do espraio, que pretende contribuir de forma objetiva para ultrapassar

a dificuldade que existe em cartografar as áreas afetadas pelo espraio em praias com morfologia irregular. Utilizaram-se posteriormente as observações de cota e alcance máximo dos espraos durante a tempestade *Christina* para validar os resultados estimados pelo modelo gerado.

Por fim, cartografou-se a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos em dois locais de estudo na costa oeste portuguesa, a praia da Foz do Lizandro e a praia das Mações, considerando três cenários distintos de agitação marítima em eventos extremos.

2. Estado Atual dos Conhecimentos

Neste capítulo é efetuada uma revisão dos conceitos associados à ocorrência de galgamentos oceânicos e aos modelos analíticos utilizados na sua determinação.

2.1 Conceitos

Na costa ocidental portuguesa, na maior parte dos casos, as ondas de vento são geradas ao largo (longe da costa) e propagam-se na direção do vento responsável pela sua geração enquanto estas não interagem com o fundo do mar (águas profundas), adquirindo dispersão devido a diferenças de velocidade e de direção de propagação. Com a aproximação à costa as ondas podem sofrer processos de refração e empolamento, causados pela interação com o fundo do mar, relevando características distintas das adquiridas na sua área de geração.

Na zona de rebentação, as variações da superfície livre associadas às ondas que atuam sobre o nível do mar podem ser separadas em três componentes (figura 1): (i) *set-up*, que corresponde ao aumento do nível médio do mar na zona de rebentação promovido pela agitação; (ii) componente gravítica, representada pela agitação incidente de períodos mais curtos (<30 segundos) e que é mais facilmente identificada através de observação direta; e (iii) componente infragravítica caracterizada por oscilações de longo período (> 30 segundos) que podem provocar variações significativas no alcance do espraio. A componente infragravítica geralmente apresenta maior amplitude em condições de tempestade influenciando as cotas atingidas pelo espraio das ondas gravíticas pelo que a integração desta componente revela-se importante nos cálculos do *run-up*.

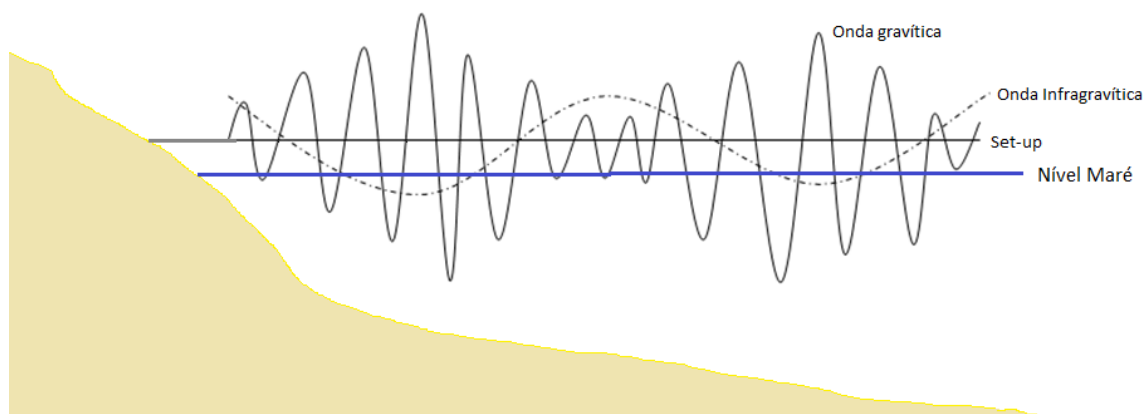


Figura 1 – Esquema representativo das diversas componentes das ondas.

O alcance do espraio das ondas depende das características das ondas e da morfologia da praia que influencia a distância percorrida e a cota atingida. Na figura 2 encontram-se um perfil de praia seccionado pelas diferentes zonas.

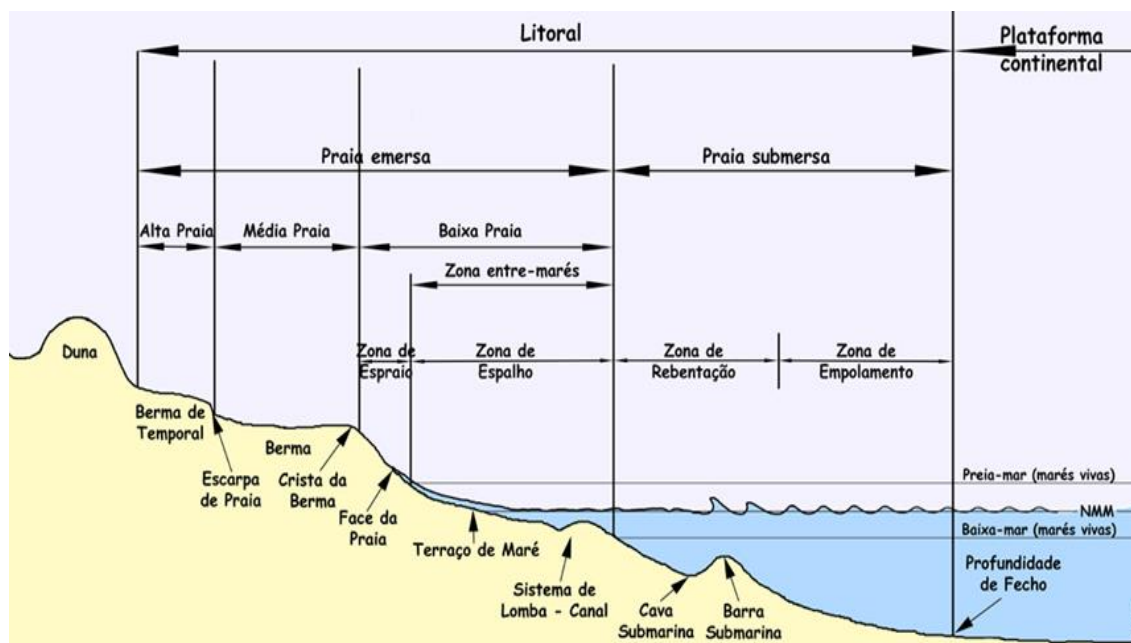


Figura 2 – Nomenclatura das diferentes divisões da praia. Fonte: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html>.

O galgamento e a inundação costeira ocorrem quando há transposição da água do mar sobre as barreiras de proteção naturais ou artificiais, havendo submersão ocasional ou prolongada (chegando a várias horas) das áreas adjacentes. A cota máxima alcançada pelo espraio pode ser determinada através do somatório das seguintes componentes verticais: (i) nível do mar, determinado pela maré astronómica (MA); (ii) sobre-elevação meteorológica (SM); e (iii) *run-up* (R), valor correspondente à distância vertical entre o nível médio do mar em determinado momento e a cota mais elevada atingida pelo espraio da onda. Esta determinação assume alguma complexidade pois o seu cálculo depende não só do conhecimento dos fatores forçadores e respetivas interações, mas também da morfologia do litoral e plataforma continental adjacente.

Durante os eventos de tempestade a sobre-elevação meteorológica e o *run-up* assumem uma maior relevância para o galgamento, embora as condições mais propícias à ocorrência de galgamento se reúnem quando se verifica simultaneamente um pico de intensidade da agitação marítima e uma preia-mar de águas vivas equinociais.

O conceito de zonas ameaçadas pelo mar encontra-se descrito no Dec. Lei 166/2008, de 22 de agosto, revisto pelo Dec. Lei 239/2012 de 2 de novembro que introduz o conceito

“zonas ameaçadas pelo mar” (ZAM) incluídas na Reserva Ecológica Nacional (REN), reforçando a importância dos fenômenos associados à erosão e galgamento do litoral, constituindo unidades de território com “... elevada suscetibilidade à ocorrência de inundações por galgamento oceânico.”.

Assim, as ZAM são faixas que se estendem desde a linha que limita o leito das águas do mar (linha de máxima preia-mar de águas vivas equinociais, LMPMAVE) em direção a terra, cuja largura é determinada pela soma de diferentes componentes: evolução da linha de costa, recuo por subida do nível médio do mar, recuo por tempestade e galgamento/inundação oceânica.

2.2 Modelos analíticos

Ao longo do tempo surgiram vários modelos para a determinação do *run-up*, havendo dois tipos de modelos, os numéricos e os analíticos. Os modelos numéricos representam um sistema físico com algumas simplificações da realidade, permitindo a utilização de diferentes propriedades físicas e a representação de variados sistemas físicos através de processos iterativos para a obtenção de um resultado final. Os modelos analíticos representam matematicamente um sistema físico através de fórmulas, onde se assumem variadas condições de simplificação para obter o resultado final. Nesta dissertação são abordados alguns modelos analíticos existentes, gerados de formas distintas, que variam tanto no número de parâmetros considerados como nos coeficientes utilizados.

Mase e Iwagaki (1984) realizaram testes laboratoriais de *run-up* em estruturas impermeáveis direcionados para o estudo de ondas irregulares na Universidade de Kyoto. Com o estudo verificaram a diminuição do número de espraços em comparação com o número de ondas incidentes. A razão entre o número de espraços e o número de ondas oscilava entre 0.2 a 0.9 sendo que os rácios mais baixos ocorriam em praias com menores declives. Apresentaram duas formulações empíricas diferentes para estimar o *run-up* de ondas irregulares em encostas impermeáveis. Mase e Iwagaki (1984) revelaram que o espraço com maior *run-up* ocorre frequentemente sozinho, ou seja, não seguido ou precedido por outros espraços devido à interferência da ressaca dos mesmos reduzindo o alcance do espraço.

Holman (1986) investigou as estatísticas do *run-up* máximo numa praia energética em Duck, Carolina do Norte, através da vídeo-monitorização da mesma. A análise espectral permitiu estudar a componente infragravítica.

Van der Meer (1988), na sua tese de doutoramento na *Delft University of Technology*, apresenta um modelo do perfil dinâmico da praia durante uma tempestade que é uma função da altura e período de onda, tamanho de grão, duração da tempestade, profundidade da água, e ângulo de ataque da onda. Uma parte do modelo é uma expressão para a altura da crista de berma que pode ser interpretado como uma estimativa de *run-up* máximo.

Mase em 1989 acrescenta mais duas representações estatísticas de *run-up* ao modelo empírico de Mase e Iwagaki (1984), incluindo coeficientes que melhoraram significativamente a correlação entre os valores previstos e os valores medidos (0.98 – 0.99).

Teixeira (2009) com intuito de demarcar o leito e a margem das águas do mar estudou e aplicou várias fórmulas por forma a verificar qual se adaptava melhor aos resultados observados, desenvolvendo assim uma nova fórmula para a costa do Algarve baseada nos dados de campo recolhidos.

Devido à natureza estocástica do *run-up* este é geralmente caracterizado com base em parâmetros estatísticos, como por exemplo: *run-up* máximo (R_{\max}), que pode ser calculado pelo espraio que atinja a maior cota; *run-up* significativo (R_s), que corresponde à média do terço dos valores mais altos de *run-up*, ou um percentil de *run-up*, geralmente 2% ($R_{2\%}$). Em seguida apresentaram-se os vários modelos para estimar o *run-up*, onde a altura de onda utilizada refere-se à altura significativa da onda ao largo não refratada (H_s) expressa em metros, o período de onda correspondente ao período de pico (T) em segundos e o declive de praia é representado através da tangente da inclinação da praia ($\tan\beta$). A ordem de apresentação das fórmulas segue, em primeiro lugar, o número de parâmetros usado na formulação, dentro deste seguiu o critério cronológico.

O modelo de Guza e Thornton (1982), desenvolvido com base em dados recolhidos nas praias da Califórnia, é representado pela seguinte equação:

$$R_s = 0.7 * H_s$$

O modelo de CERC (*Coastal Engineering Research Center*) (1995), desenvolvido na *US Army Engineer Waterways Experiment Station*, estima o *run-up* com base na altura da onda ao largo, para diferentes níveis de excedência dos espraio, como $R_{2\%}$.

$$R_{2\%} = 0.5H_s + 2.05 * 0.4H_s$$

Teixeira (2009) utilizou as cotas das linhas de preia-mar impressas no areal em sete praias do litoral algarvio em conjunto com estimativas visuais da altura da agitação incidente, e desenvolveu a seguinte equação:

$$R_{\text{máx}} = 0.80H_s + 0.62$$

Hunt (1959), que realizou um estudo sobre os níveis de espraio em enrocamentos, concluiu que a altura atingida pelo espraio também depende da inclinação da zona de espraio, apresentando a seguinte equação:

$$R_{2\%} = 8H_s * \tan\beta$$

Battjes (1971, in Komar, 1998) relacionou a altura do espraio com o número de Iribarren (ξ_0), sendo esta expressão testada posteriormente por diversos autores em condições naturais e também em laboratório, em inúmeras condições distintas.

$$R_{2\%} = H_s * c * \xi_0$$

onde,

c – constante

ξ_0 - número de Iribarren

$$\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{(H_s/L_0)}$$

onde:

L_0 – comprimento de onda ao largo ($= 1.56 T_p^2$);

Tendo por base o modelo de Battjes, Holman (1986) aplicou o modelo com outros dados de praias naturais tendo deduzido a seguinte expressão:

$$R_{2\%} = 0.92H_s * \xi_0$$

Por outro lado, Mase (1989) que testou o mesmo modelo em laboratório para praias impermeáveis e ondas irregulares apresentou a seguinte fórmula:

$$R_{2\%} = 1.86H_s * \xi_0^{0.71}$$

Masselink e Hughes (2003) apresentam um modelo que acrescenta uma constante empírica (K) aos parâmetros das ondas e declive de praia:

$$R_{2\%} = K * \sqrt{H_s * 1.56 * T_p^2} * \tan \beta$$

No modelo de Stockdon et al. (2006) o *run-up* é calculado através do somatório de três componentes distintas: set-up ($\langle \eta \rangle$), componente gravítica (S_{inc}) e componente infragravítica (S_{IG}):

$$R_{2\%} = 1.1 * \left[\langle \eta \rangle + \frac{\sqrt{S_{inc}^2 + S_{IG}^2}}{2} \right]$$

onde:

$$\langle \eta \rangle = 0.35 \tan \beta * (H_s L_0)^{1/2}$$

$$S_{inc} = 0.75 \tan \beta * (H_s L_0)^{1/2}$$

$$S_{IG} = 0.06 * (H_s L_0)^{1/2}$$

Deste modo a equação do run-up pode ser expressa por:

$$R_{2\%} = 1.1 \left[0.35 * \tan \beta * (H_s * L_0)^{1/2} + \frac{[H_s * L_0 (0.563 * (\tan \beta)^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right]$$

A tabela 1 sintetiza a dependência que as várias expressões apresentam da altura e período da agitação incidente e do declive da praia, possibilitando uma melhor comparação entre os vários modelos.

Tabela 1 – Síntese dos modelos analíticos estudados.

Modelo	H	T	Declive	Constante
Guza e Thornton (1982) , R_s	H_s	---	---	0.70
CERC (1995) , $R_{2\%}$	H_s	---	---	1.30
Teixeira (2009) , R_{max}	H_s	---	---	0.80
Hunt (1959) , $R_{2\%}$	H_s	---	$\tan \beta$	8.00
Holman (1986) , $R_{2\%}$	$\sqrt{H_s}$	T_p	$\tan \beta$	1.149
Mase (1989) , $R_{2\%}$	$H_s^{0.645}$	$T_p^{0.71}$	$\tan \beta^{0.71}$	2.178
Masselink e Hughes (2003) , $R_{2\%}$	$\sqrt{H_s}$	T_p	$\tan \beta$	$k * \sqrt{1.56}$

O parâmetro declive de praia, apesar da sua importância não tem apresentado uma consistência na sua designação nem nos seus limites e métodos de cálculo. A título de exemplo, a denominação do declive de praia varia consoante os autores, podendo encontrar-se: “*beach slope*” (e.g., Guza e Inman, 1975; Van Koningsveld et al. 2005), “*beach face slope*” (e.g., Komar, 1976), “*foreshore slope*” (e.g., Larson et al., 2004),

“*beach gradient*” (e.g., Simpson, 2005), “*beach steepness*” (Stockdon et al., 2006) and “*coastal slope*” (e.g., Sutherland, 2010).

Os limites da zona do perfil de praia utilizados para estimar o declive não são consensuais, e frequentemente os critérios utilizados na sua definição e medição não são claros ou não são apresentados. Outros autores referem isto mesmo: "Não há uma técnica padrão de como é medida a inclinação da face de praia, e este facto por si só pode muito bem explicar um pouco da dispersão que é aparente nos dados disponíveis" (Hughes e Turner, 1999), "A definição de uma inclinação única da praia torna-se difícil em praias naturais com perfis tipicamente côncavas e é ainda mais complicada pela presença de barras" (Stockdon et al, 2006), "A primeira dificuldade adicional apresentada pelas praias naturais é, portanto, o significado do termo «inclinação da praia» não ser consensual." (Nielsen e Hanslow, 1991), e "Perfis de praia com inclinações médias semelhantes podem ter diferentes configurações, que devem ser levadas em conta quando se estuda a resposta da praia..." (Makaske e Augustinus, 1998).

O limite oceânico para o cálculo do declive pode corresponder à zona de rebentação, ao nível médio do mar ou ao nível do mar sobre o qual as ondas atuam sobre o perfil da praia; o limite terrestre também é variável, podendo corresponder à crista da berma, à base da duna ou local até onde o espraio se propaga. Esta problemática tem consequências muito relevantes na utilização das fórmulas de *run-up*.

A utilização de um declive médio da zona de espraio para estimar o *run-up* pode, por vezes, fornecer um valor de alcance vertical significativamente diferente do que se observa no campo. Este facto relaciona-se com o tipo de praia em consideração: nas praias com perfil dissipativo (figura 3-A), a inclinação da zona de espraio é baixa, permitindo que o alcance horizontal do espraio (*run-in*) seja muito superior ao alcance vertical do espraio (*run-up*), nestas praias existe uma tendência para que o *run-up* em condições de tempestade seja subestimado; nas praias com perfil refletivo (figura 3-B), a inclinação da face de praia é maior, possibilitando que o espraio atinja rapidamente cotas mais elevadas, nestas praias o *run-up* em condições de tempestade é geralmente sobrestimado. Quando o espraio transpõe a crista da duna, a adoção de um declive constante que permita estimar o *run-up* corretamente para condições de eventos extremos, torna-se complexa.

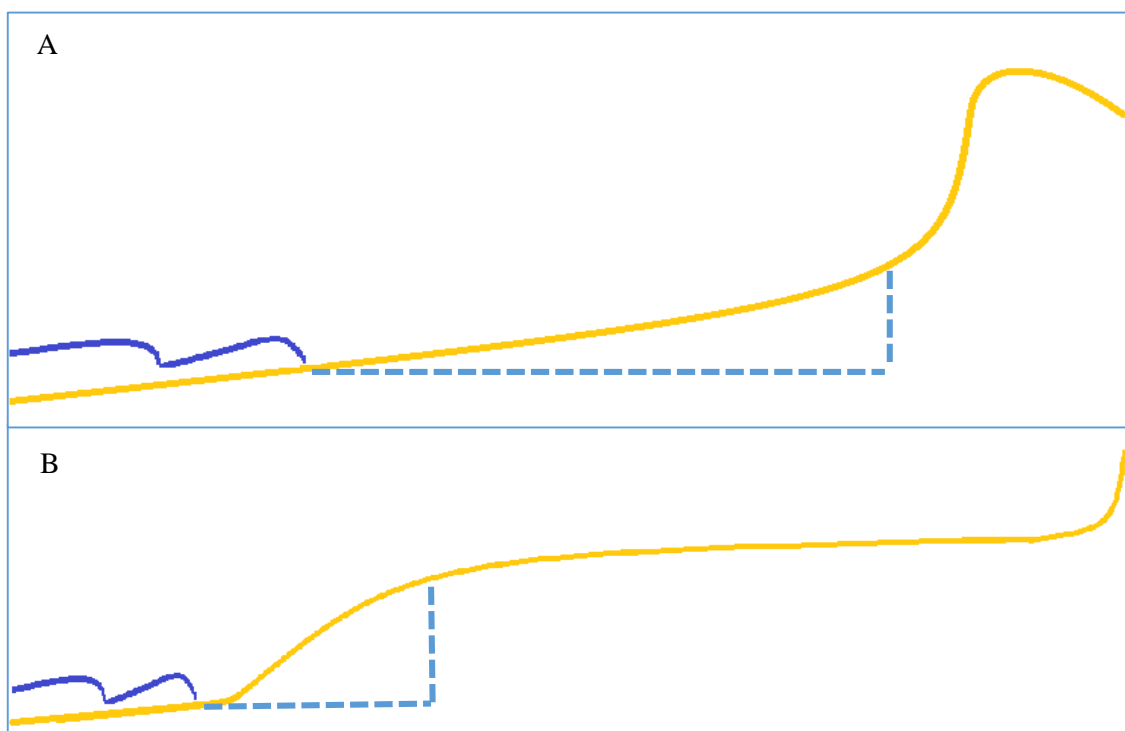


Figura 3 – A) *run-up* subestimado; B) *run-up* sobrestimado.

O estudo de praias com uma morfologia irregular ao longo do perfil tem revelado que o alcance vertical e horizontal do espraio de uma onda varia consoante o declive e largura de cada segmento da praia emersa. A determinação do *run-up* através de um declive constante para a área em estudo pode não ser a forma mais correta de estabelecer a cota de máximo espraio, pelo que alguns autores têm desenvolvido novas estratégias em praias com declives compostos.

Saville (1957) apresentou um método para a determinação do *run-up* em estruturas com declives compostos, onde o perfil constituído por face de praia, berma e uma estrutura de declive íngreme é substituído por um declive único hipotético entre a profundidade de rebentação e o ponto de máximo *run-up* estimado. Usando este declive hipotético, os valores de *run-up* puderam ser determinados por um método de iterativo a partir das estimativas sucessivas de declives e respetivos valores de *run-up*, sendo o processo repetido até que os valores de *run-up* obtidos sejam idênticos para dois ensaios consecutivos. A precisão das estimativas do método foi considerada satisfatória em comparação com os valores observados experimentalmente em testes laboratoriais, concluindo que a utilização deste método simplificaria a determinação de *run-up* aplicado a estruturas.

3. Áreas de estudo

O modelo concetual de determinação do alcance máximo do espraio foi aplicado a duas praias localizadas na costa ocidental portuguesa. A escolha das praias Foz do Lizandro e Mações prende-se com o seu contexto geográfico, acessibilidade e principalmente com a existência de dados que possibilitaram a validação do modelo. A aplicação dos modelos analíticos para estimar o *run-up* em condições de baixa energia foi realizada na praia Grande e na praia da Foz do Lizandro, figura 4.

A praia das Mações pertence ao município de Sintra, é limitada por arribas vivas a norte e a sul, apresenta cerca de 200 metros de extensão com orientação N30°E. No limite sul, junto à arriba, desagua a ribeira de Colares. A escolha desta praia deve-se à sua exposição considerada representativa de praias de alta energia do litoral oeste.

A praia da Foz do Lizandro situa-se no concelho de Mafra, na freguesia de Carvoeira. Esta desenvolve-se a norte da foz do rio Lizandro com uma extensão de aproximadamente 450 metros, com orientação N10°E. A praia encontra-se limitada a norte e a sul por arribas vivas, sendo que a foz do rio Lizandro desagua junto à arriba sul, permitindo a continuação da praia para montante ao longo da margem direita do canal.

A praia Grande localiza-se no concelho de Sintra, a sul da praia das Mações, desenvolvendo-se entre o promontório do Calhau do Corvo (a sul) e uma estrutura correspondente à piscina oceânica (a norte) e estende-se ao longo de cerca de 800 metros de comprimento com uma orientação N30°E. Adicionalmente, a escolha desta praia está relacionada com a oportunidade para a aquisição de dados durante uma campanha de campo realizada a 8 de setembro de 2014, promovida no âmbito do projeto *Beach to Canyon* - Processos de Transferência Sedimentar Praia-Canhão (contrato PTDC/MAR/114674/2009), em articulação com o plano de trabalhos de doutoramento “Processos de transposição sedimentar em promontórios” (contrato SFRH/BD/79126/2011), ambos financiados pela Fundação para Ciência e a Tecnologia.

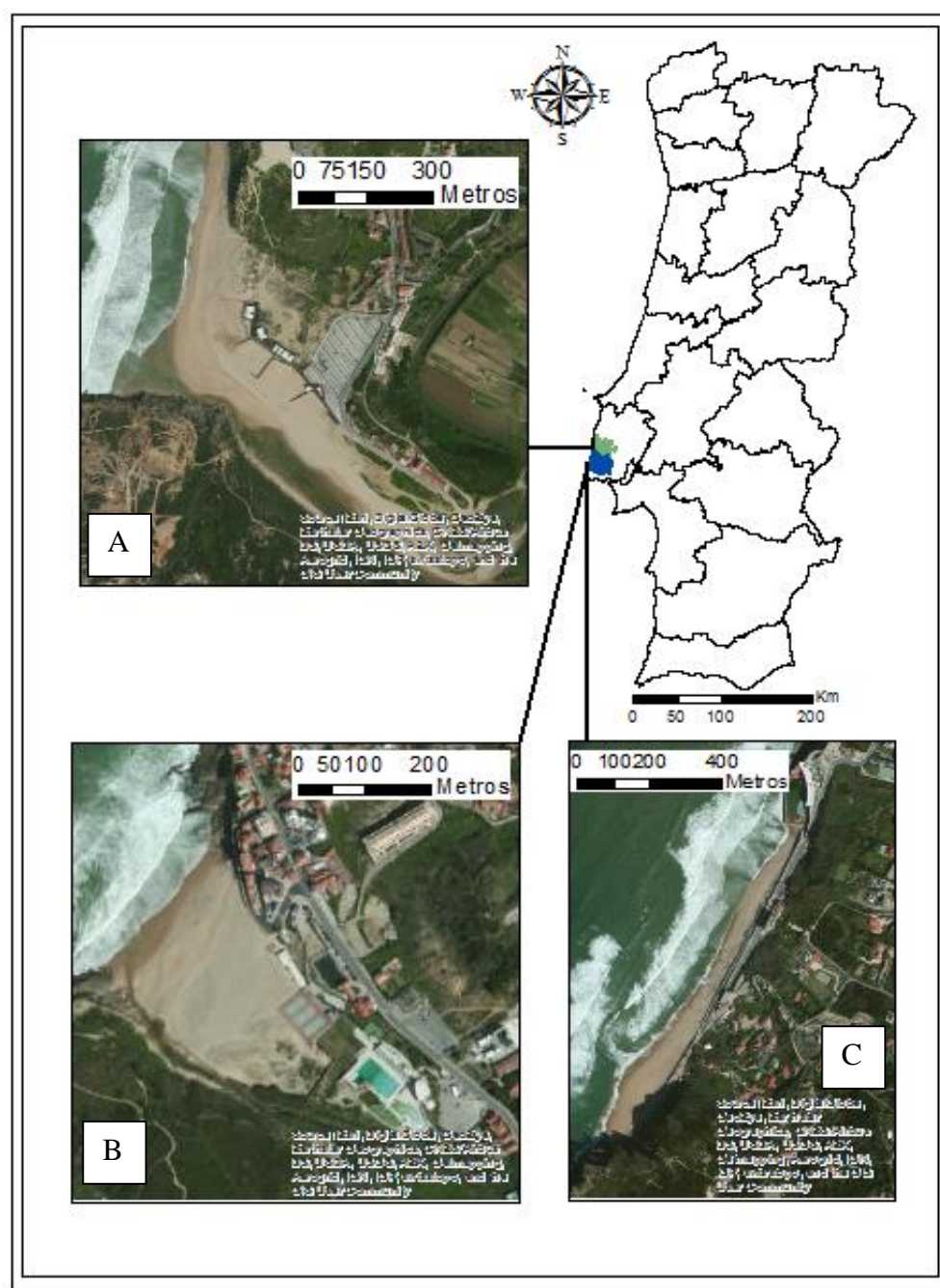


Figura 4 – Enquadramento geográfico dos três locais de estudo. A) praia da Foz do Lizandro; B) praia das Maças; C) praia Grande.

4. Métodos

Neste capítulo encontram-se descritas todos os métodos utilizados no desenvolvimento de um modelo concetual de previsão do máximo espraio e na cartografia de áreas vulneráveis a galgamentos oceânicos.

4.1 Modelo Concetual

Neste trabalho procurou-se estabelecer um modelo concetual de determinação do alcance máximo do espraio, para praias limitadas por dunas do litoral oeste português através de dados de agitação marítima ao largo e dados morfológicos. A aplicação do modelo permite posteriormente cartografar a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos como se encontra esquematizado na figura 5.

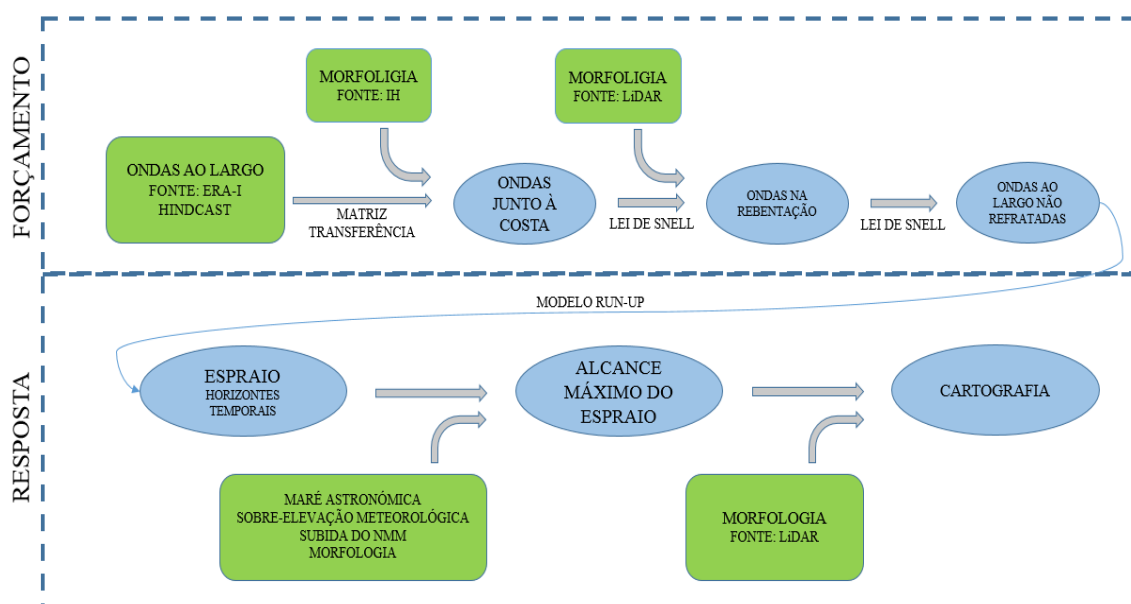


Figura 5 – Esquema do procedimento de aplicação do modelo concetual.

4.1.1 Máximo Espraio

A cota do máximo espraio resulta do somatório de dois fatores: o nível do mar, que contempla a maré astronómica e a sobre-elevação meteorológica; e o *run-up*, que consiste na distância vertical atingida pelo espraio (figura 6). A previsão do máximo espraio para um horizonte temporal requer ainda a adição da subida do nível médio do mar prevista até essa data.

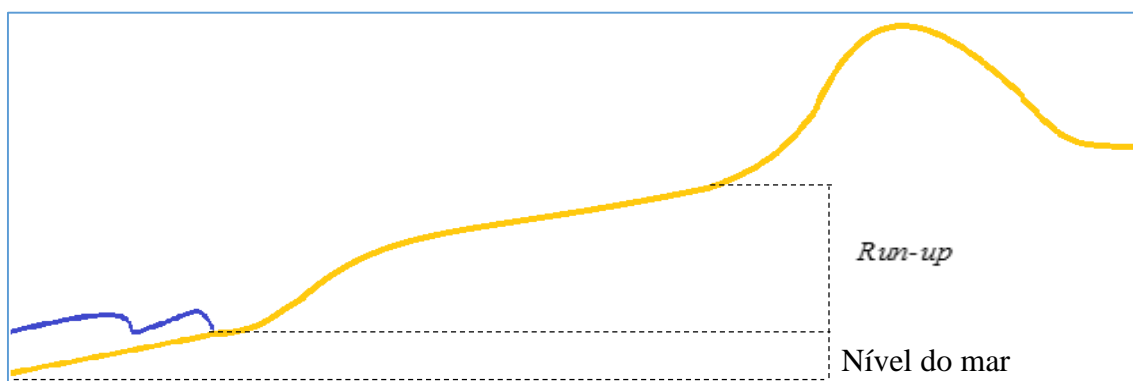


Figura 6 – Esquema do cálculo do máximo espraio.

4.1.2 Nível do Mar

O nível do mar, em condições de eventos extremos, resulta da maré astronómica acrescida da sobre-elevação meteorológica. Os valores destas componentes, utilizado para estimar o máximo espraio, foram extraídos do artigo de Antunes (2014) “Eventos extremos e a variação do nível do mar”. Para os horizontes temporais de 2050 e 2100 explicados no ponto 3.2, optou-se por utilizar um único valor de nível do mar extremo, com baixa probabilidade de ocorrência, atendendo ao princípio da precaução.

4.1.3 Topografia

A topografia utilizada para a aplicação do modelo concetual foi obtida através de imagens LiDAR aéreo (*Light Detection And Ranging*) da zona costeira (fonte: Direção Geral do Território, 2013) que representa o modelo digital de elevação da zona litoral com uma resolução de 2 metros, e que se prolonga para terra por aproximadamente de 400 m.

4.1.4 Fórmula de *run-up*

A seleção e calibração da fórmula que melhor se aplica aos casos de estudo resultou da aquisição (ponto 4.3.1) e análise de dados (ponto 5.2) de forçamento oceanográfico e reposta em condições de baixa energia (dados adquiridos na praias Grande e Foz do Lizandro) e em condições de temporal (dados recolhidos pela Administração de Região Hidrográfica do Tejo, ARH/Tejo).

A fórmula selecionada foi Stockdon modificada (2015), calibrada a partir da fórmula Stockdon et al. (2006), expressa pela seguinte equação:

$$R_{\text{máx}} = 1.1 \left[\frac{[H_s * L_0 (6.350 * (\tan\beta)^2 + 0.053)]^{\frac{1}{2}}}{2} \right]$$

Os parâmetros de onda, H_s e T_p , são referente à altura significativa da onda ao largo e período de pico correspondente. Quanto ao parâmetro morfológico, $\tan\beta$, procurou-se estabelecer duas metodologias distintas para o seu cálculo por forma a determinar qual apresentaria melhores resultados na estimativa do *run-up*: i) metodologia restrita, usando como limites o nível do mar e a base duna; e ii) metodologia holística utilizando um processo iterativo de cálculo sucessivo de declives, à medida que o espraio se propaga pela praia emersa e duna, entre o nível do mar e o limite espraio. A descrição destas metodologias encontra-se no ponto 4.1.4.2.

4.1.4.1 Cálculo dos parâmetros das ondas

As fórmulas que estimam o *run-up* utilizam valores de altura de onda significativa e período de pico ao largo, porém, não têm em consideração a refração que as ondas sofrem até chegarem à zona de rebentação. Deste modo para aplicar as fórmulas e determinar o alcance máximo dos espraio foi imprescindível transformar os dados de agitação marítima ao largo existentes numa agitação marítima ao largo teórica em que estivesse removido o efeito da refração.

Utilizou-se um grupo de ondas ao largo gerado a partir de um modelo espectral de onda de terceira geração, o Wavewatch III (WW3), forçado por campos de vento conhecidos a partir de reanálise atmosférica ERA-Interim (Dee et al., 2011) num registo contínuo entre 1 de janeiro de 1979 e 5 de maio de 2014 com intervalos de três horas (Bertin et al., 2013). Através de uma rotina de MATLAB criou-se de seguida uma matriz de transferência para cada local de estudo com base na informação batimétrica fornecida pelo Instituto Hidrográfico (IH). Os parâmetros significativos das ondas ao largo (H_s , T_p , direção e profundidade) foram recalculados através da matriz de transferência que originou o conjunto de ondas junto à costa para a batimétrica dos 15 metros. Entre esta batimétrica e a linha de costa, e recorrendo aos dados de LiDAR para cada caso de estudo, considerou-se uma batimetria linear e paralela à linha de costa e aplicou-se a lei de *Snell* para obter o conjunto de dados na rebentação. Por fim empregou-se a lei de *Snell* às ondas na rebentação para obter o conjunto de ondas ao largo não refratadas.

3.1.4.2 Cálculo do declive

O cálculo do declive da praia para inclusão na fórmula de *run-up* seguiu duas abordagens e metodologias que se descrevem a seguir:

Metodologia restrita

O cálculo do declive de praia na metodologia restrita apoiou-se apenas na morfologia da praia, não tendo em conta as ondas e o nível do mar em condições de eventos extremos para os quais se pretendeu estimar o alcance máximo do espraio. Nesta metodologia o declive foi calculado entre o NMM e a base da duna.

Metodologia holística

A metodologia holística contempla uma compreensão alargada dos fenómenos que concorrem para o alcance do máximo espraio, pelo que o cálculo do declive depende das ondas e do nível do mar em condições de eventos extremos e da morfologia da praia e do sistema dunar adjacente.

Nesta metodologia o declive foi calculado através do seguinte procedimento:

(i) inicialmente identifica-se o nível de maré máximo, visto que é a partir daí que o espraio se começa a propagar pelo perfil de praia, passando este a ser considerado como o ponto inicial do cálculo do declive;

(ii) de seguida estimam-se as cotas ao longo do perfil (em intervalos regulares) e determina-se o declive entre cada ponto e o início do perfil (figura 7). Assumiu-se que em condições extremas os perfis começam a ser atuados pelo espraio das ondas no decorrer da tempestade, suavizando a inclinação do perfil pelo que o potencial de alcance horizontal do espraio aumenta;

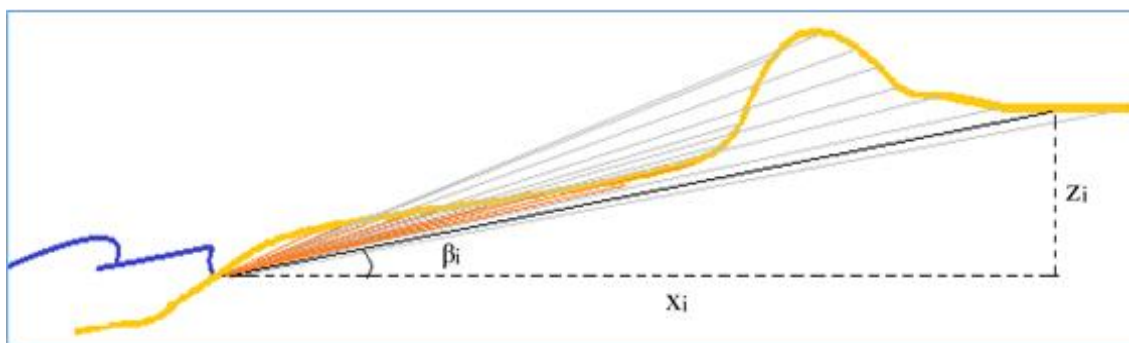


Figura 7 - Esquemática do cálculo do declive para cada intervalo de 10 centímetros.

(iii) o máximo espraio (considerando o *run-up* a maré astronómica, a sobre-elevação meteorológica e a subida do NMM) foi estimado para cada segmento tendo em conta o respetivo declive. Considerou-se que o alcance máximo do espraio (horizontal e vertical) ocorre até ao local onde o somatório destas componentes se apresente superior à cota do terreno (figura 8).

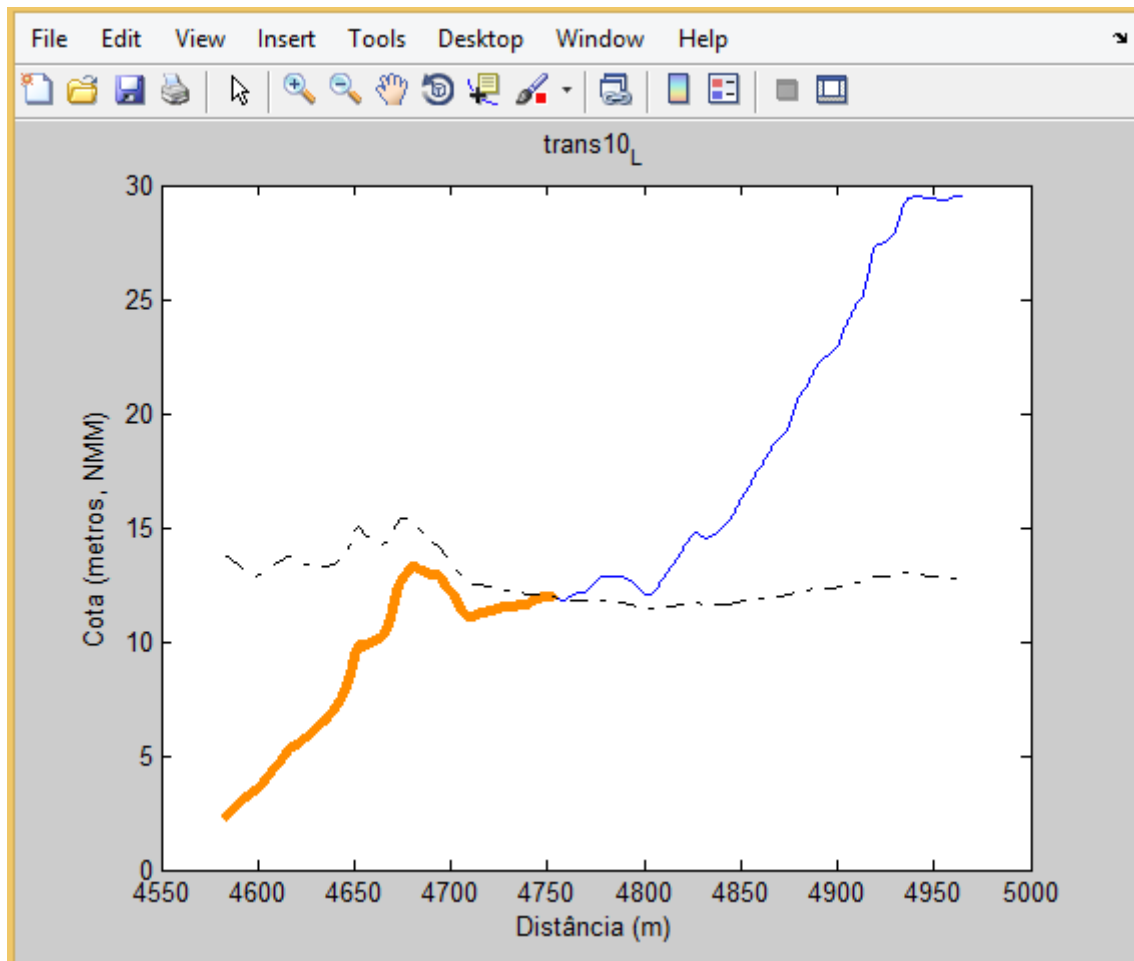


Figura 8 – Representação do alcance máximo do espraio (a laranja) e estimativa do run-up para cada intervalo de 10 cm (a tracejado).

4.2 Cartografia das ZAM

A cartografia das ZAM foi estabelecida com base no cálculo de alcance máximo do espraio, efetuado para três cenários hipotéticos de condições extremas de agitação, nível de maré e subida do nível médio do mar. A ocorrência conjunta de valores extremos destes três parâmetros tem uma recorrência não determinada e probabilidade certamente muito baixa, no entanto fornece cenários baseados no princípio da máxima precaução, ideais para a cartografia de vulnerabilidade costeira.

Estes cenários resultaram da soma de três componentes distintas: (i) ondas com períodos de retorno de 35 e 85 anos para os horizontes temporais de 2050 e 2100 respetivamente; (ii) nível do mar, composto por uma maré astronómica de 1.5 metros e sobre-elevação meteorológica de 0.50 metros, para ambos os horizontes temporais, tendo estes valores períodos de retorno muito grandes que não correspondem aos períodos de retorno das ondas; e (iii) subida do nível médio do mar previsto para cada horizonte temporal de acordo com as projeções da subida do nível do mar previstas em Rahmstorf (2012), anexo A. Desta forma, os três cenários de vulnerabilidade associados ao galgamento costeiro cartografados foram os seguintes:

(i) tempestade de referência: tempestades com as características da tempestade *Christina*, em que foi determinada a altura de onda ao largo não refratada para cada praia, o período de pico correspondente, a altura da máxima preia-mar do dia da tempestade (1.36 metros) e a sobre-elevação meteorológica registada (0.03 metros);

(ii) horizonte temporal 2050: tempestades extremas com período de retorno de 35 anos, maré astronómica de 1.5 metros, sobre-elevação meteorológica de 0.50 metros e subida do nível do mar prevista para 2050 de 0.35 metros;

(iii) horizonte temporal 2100: tempestades extremas com período de retorno de 85 anos, maré astronómica de 1.5 metros, sobre-elevação meteorológica de 0.50 metros e subida do nível do mar prevista para 2100 de 1.00 metros.

As zonas ameaçadas pelo mar encontram-se compreendidas entre a linha de máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE), que limita o leito das águas do mar, e o alcance máximo do espraio estimado para cada horizonte temporal, visto que neste estudo não foi contemplada a componente de recuo da linha de costa assumindo-se assim que a praia se encontra em equilíbrio sedimentar.

No ArcMap 10.2 foram traçados vários perfis paralelos entre si e perpendiculares à linha de costa com auxílio da ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*),

desenvolvida pela USGS (Thieler et al., 2009), sobre dados topográficos obtidos através do LiDAR. Cada perfil retilíneo consiste num conjunto de pontos com intervalos de um metro que contém informação altimétrica extraída do modelo digital de elevação. Sobre estes perfis foi aplicado o método descrito acima para cálculo do alcance máximo do espraio, tendo cada perfil associado um valor estimado de distância horizontal e cota do espraio para cada horizonte temporal definido (“pontos estimados” na figura 9). O traçado do limite terrestre das áreas vulneráveis a galgamentos oceânicos para cada horizonte temporal foi realizado através de uma ligação composta entre os pontos de cada perfil, tendo em conta a morfologia da área de estudo entre os mesmos. Esta ligação torna a cartografia mais realista do que uma ligação simples onde o relevo não seja considerado, como se verifica na figura 9.

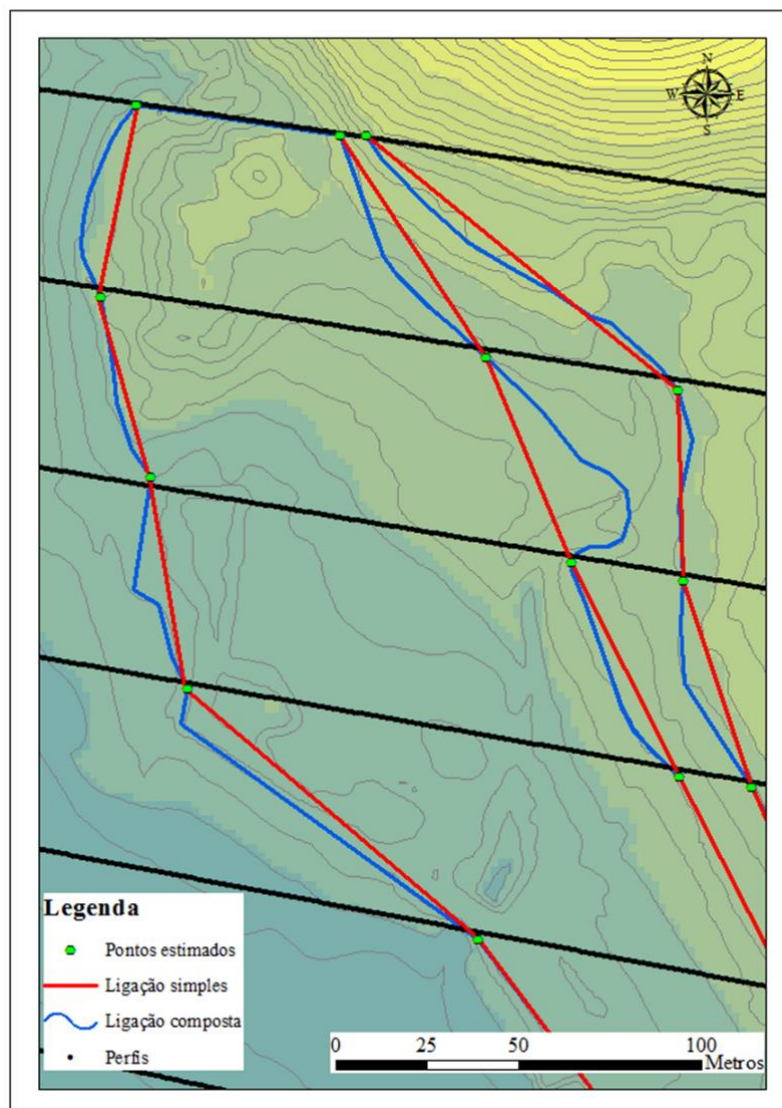


Figura 9 – Representação da ligação entre os pontos de alcance máximo dos espraios estimados.

4.3 Calibração e validação

Neste ponto encontram-se descritos os métodos utilizados para selecionar e calibrar a fórmula de *run-up* e para validar o modelo concetual descrito.

4.3.1 Seleção e calibração fórmula de *run-up*

Após a revisão dos modelos analíticos para de previsão do alcance vertical do espraio, procedeu-se a aplicação e validação dos mesmos em condições de agitação marítima de baixa energia e em condições de temporal por forma a selecionar uma fórmula empírica que permitisse uma melhor aplicabilidade de modelo concetual.

3.3.1.1 Condições de baixa energia

A aquisição de dados morfológicos e oceanográficos para a caracterização das condições de baixa energia foi feita durante as campanhas de campo realizadas a 8 de setembro de 2014, na praia Grande, e a 4 de abril de 2014 na praia da Foz do Lizandro.

Os dados topográficos foram adquiridos com um GPS-RTK (*Global Positioning Systems - Real-Time Kinematic*) e incluíram o levantamento de vários aspetos da morfologia das praias e a medição das cotas de *run-up*. Na praia Grande, foram ainda adquiridas imagens do espraio das ondas com um sistema de vídeo-monitorização para complementar o estudo do *run-up*, e também dados oceanográficos com transdutores de pressão e um mini-ADP (*Acoustic Doppler Profiler*).

Topografia

Os dados topográficos relevantes para o presente estudo foram adquiridos com um GPS-RTK, consistindo na medição de quatro perfis transversais à linha de costa ao longo de toda a praia, e medição do espraio das ondas em três intervalos de tempo distintos com duração aproximada de 10 minutos de recolha de dados (figura 10). Os perfis transversais resultaram da medição automática da cota do terreno metro a metro, o registo de espraio consecutivos baseou-se na medição da cota máxima alcançada por cada espraio junto ao perfil onde foram colocados os transdutores de pressão e o mini-ADP. Por fim, no gabinete, todos os dados foram descarregados do aparelho através do *software* Leica GeoOffice para posteriormente poderem ser tratados em Excel, ArcGIS e MATLAB.



Figura 10 – Levantamentos topográficos e localização dos aparelhos de recolha de dados na Praia Grande.

A morfologia da praia da Foz do Lizandro (figura 11) foi caracterizada através de oito perfis transversais ao longo da praia e da delimitação da base da escarpa de erosão talhada na duna frontal da área de estudo. Delimitou-se também a margem direita da foz do rio Lizandro. Para caracterizar o espraio foi medido o respetivo alcance máximo em cem espraio consecutivos com o GPS-RTK (figura 12). Este levantamento foi efetuado ao longo de um perfil, com menor dispersão lateral possível para que os dados retirados fossem mais representativos. A medição ocorreu perto da hora prevista para a baixa-mar (aproximadamente 11:20h).

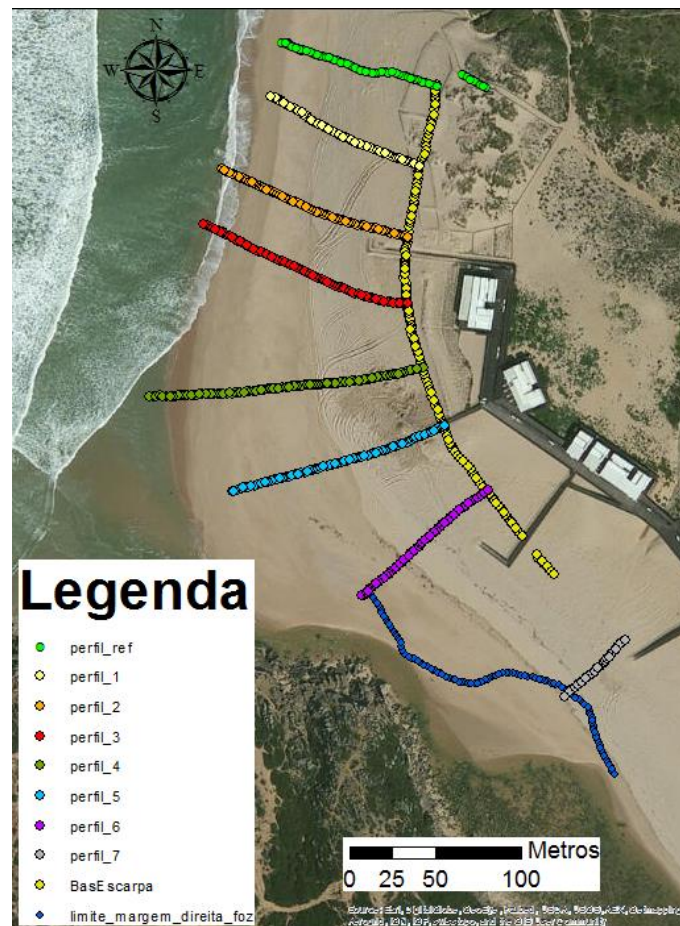


Figura 11 – Levantamento topográfico da praia da Foz do Lizandro.

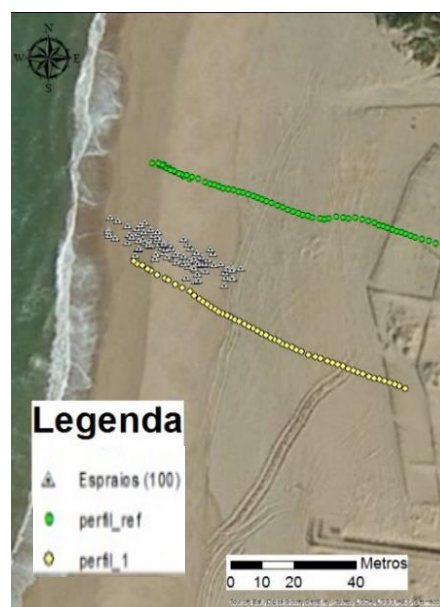


Figura 12 – Medição dos 100 espraios consecutivos na Foz do Lizandro pelas 11:20h.

Forçamento oceanográfico

A aquisição de dados oceanográficos na praia Grande foi realizada com dois transdutores de pressão, figura 13-A e 13-C, e um mini-ADP, figura 13-B e 13-D, que foram instalados no terraço de maré durante a baixa-mar no início da campanha, representados na figura 10.

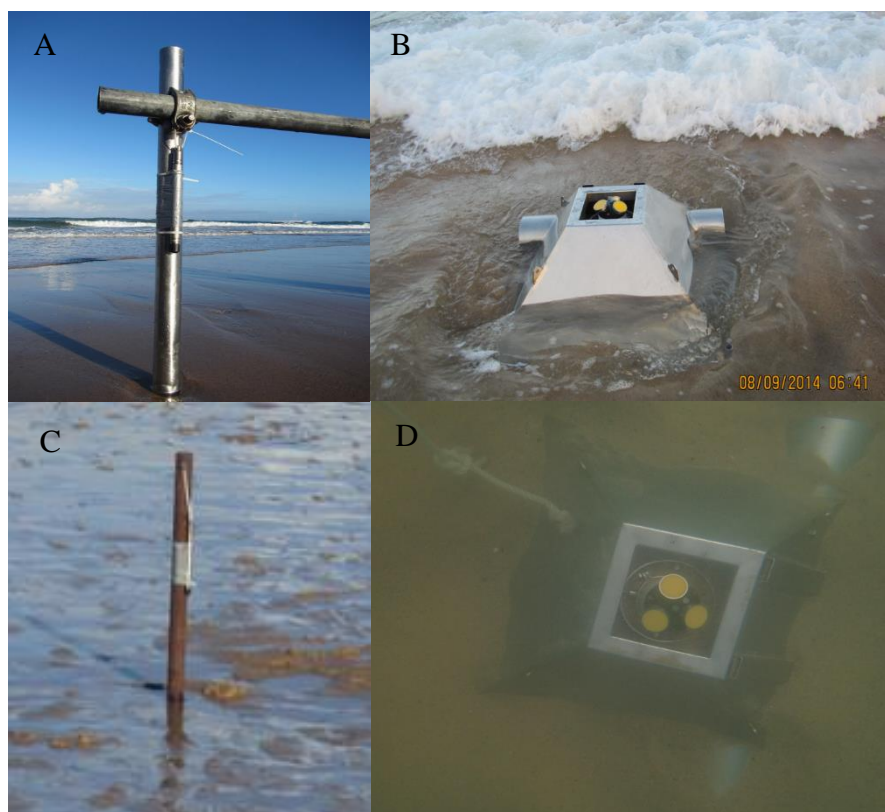


Figura 13- Imagens dos aparelhos de recolha de dados oceanográficos: A) PT_72; B) mini-ADP emerso; C) PT_70; D) mini-ADP submerso.

Os dados recolhidos pelo mini-ADP entre as 10:30h e as 18:15h, resultaram da recolha de dados em intervalos de 30 minutos com a duração de aquisição de 10 minutos, posteriormente analisados no *software* ViewADP Pro® (Sontek®, 1500 Hz), fornecendo assim valores da altura significativa, período de pico e direção das ondas e altura da coluna de água.

Os dados adquiridos pelos transdutores de pressão (*In Situ Leve Troll*), consistem no registo da pressão na coluna de água a cada intervalo de 0.5 segundos durante toda a campanha. Estes foram analisados de duas formas distintas: por análise temporal em Excel, interpolando as pressões registadas para oscilações na coluna de água, utilizando as amplitudes das oscilações como alturas das ondas e a diferença entre cada valor mínimo como período de onda, desta forma calculou-se a média do terço das ondas que

ocorreram entre as 16:28h e as 16:40h obtendo H_s e T correspondente; e por análise espectral em MATLAB, sendo realizada a análise da onda completa e também decomposta em componente gravítica (ondas de alta energia) e componente infragravítica (ondas de baixa energia).

No caso da praia da Foz do Lizandro não houve possibilidade de utilizar equipamentos oceanográfico, pelo que a altura significativa das ondas foi obtida através do método de Bascom (figura 14). Este método consiste numa técnica expedita, em que o observador estabelece contacto visual com a linha do horizonte enquanto se desloca ao longo de um perfil transversal à praia até verificar que o topo da crista da onda mais alta intersecta, sem transpor, a linha imaginária criada entre si e a linha do horizonte. A cota dos olhos do observador corresponde aproximadamente à cota da onda seleccionada, que neste trabalho foi medida com o GPS-RTK.

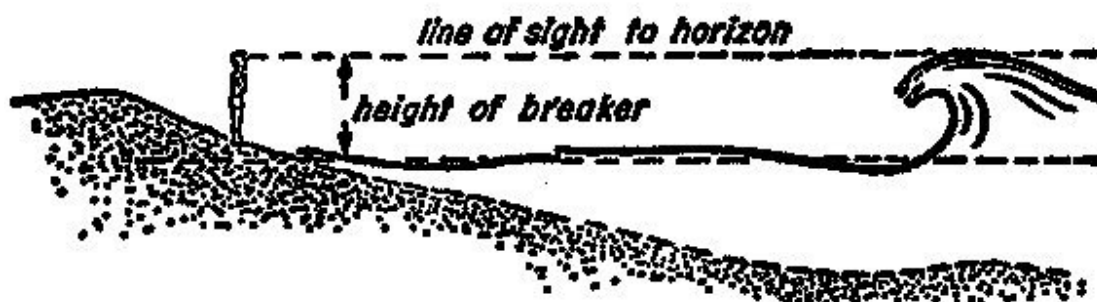


Figura 14 – Cálculo da altura da onda pelo método de Bascom.

Os dados das ondas medidas no campo foram complementados com os dados de agitação marítima registados pela boia-ondógrafo de Leixões e os níveis de maré previstos para Cascais pela FCUL (tabela 2).

Tabela 2 – Previsão de marés para 4 de abril de 2014.
http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html

Dia	Hora	estado	altura ZH (m)	altura NMM (m)
04/04/2014	05:20	Preia-Mar	3.25	1.25
04/04/2014	11:18	Baixa-Mar	1.19	-0.81
04/04/2014	17:38	Preia-Mar	3.23	1.23
04/04/2014	23:47	Baixa-Mar	1.24	-0.76

Vídeo-monitorização

A vídeo-monitorização é uma forma de monitorizar as zonas costeiras com uma frequência e uma duração de amostragem que se ajusta à escala de tempo da evolução litoral, permitindo monitorizar locais onde a colocação de outro tipo de instrumentação se torna difícil. A análise das imagens adquiridas com o sistema de vídeo permite quantificar variações morfológicas e hidrodinâmicas ocorridas nas praias (incluindo o espraio das ondas), uteis para a compreensão dos processos costeiros.

Na praia Grande a aquisição dos dados foi realizada através de uma câmara instalada para o efeito no promontório do Calhau do Corvo, limite sul da praia, permitindo identificar o limite do espraio de cada uma das ondas, figura 15.

As imagens de vídeo captadas durante a campanha foram posteriormente processadas. O processamento das imagens incluiu: a correção de modo a eliminar a distorção da lente a partir do conhecimento de parâmetros intrínsecos, originando imagens oblíquas; retificação através de parâmetros de orientação externa, denominando-se imagens equivalentes verticais; e por fim a orto-retificação com auxílio dos pontos de controlo (GCP) para que contenham informação altimétrica.



Figura 15 – Imagem original captada pela câmara de vídeo.

3.3.1.2 Tempestade Christina

O inverno de 2014 ficou marcado pelas tempestades que afetaram essencialmente o litoral do país devido à intensa agitação marítima que provocou danos em estruturas costeiras, erosão de praias e inúmeros galgamentos e inundações. A tempestade *Christina*, caracterizada por ventos fortes, intensa agitação marítima e grande pluviosidade, resultou de depressões originadas na parte leste dos EUA, desde meados de dezembro de 2013, que sofreram processos de ciclogénese explosiva na passagem pelo Atlântico Norte, devido ao forte contraste entre a massa de ar muito frio sobre a parte leste dos EUA e a massa de ar quente e húmido do Atlântico (IPMA, 2014).

Esta depressão originou valores muito elevados de ondulação no Atlântico Norte, que atingiu o pico do temporal no dia 6 de janeiro de 2014, com ondas de altura significativa máxima de cerca de 9.0 metros e período de pico de 14.6 segundos na costa ocidental. Segundo Antunes (2014) a sobre-elevação meteorológica foi de 0.03 metros e a preia-mar registada naquele dia atingiu os 1.36 metros.

No âmbito da elaboração do relatório “Impactos das tempestades extratropicais do inverno de 2014 nas praias da APA, I.P. / ARH/Tejo” realizado pela FCUL, foram realizados levantamentos topográficos dos perfis de praia e dos valores de máximo espraio bem como dados da altura, período e direção das ondas na rebentação, nas seguintes praias monitorizadas. Deste modo, a partir das características das ondas na rebentação, nas diversas praias monitorizadas, foram estimados os parâmetros dessas ondas ao largo sem o efeito de refração (tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização dos parâmetros da tempestade Christina nas praias monitorizadas pela ARH/Tejo (Pedras Negras (PN), Paredes de Vitória (PV), Nazaré (NZ), Pedras D’El Rei (PDR), Santa Cruz (SC), Fonte da Telha (FT) e Lagoa de Albufeira (LA)).

parâmetro	PN	PV	NZ	PDR	SC	FT	LA
Hb (m)	7.80	8.30	5.60	7.50	8.20	5.40	6.60
T (s)	15.60	15.70	12.10	14.60	15.50	15.40	14.30
α (°)	4.0	2.0	-6.0	10.0	1.0	-10.0	-8.0
$\tan \beta$	0.095	0.100	0.130	0.080	0.130	0.100	0.150
Db (m)	10.00	10.64	7.18	9.62	10.51	6.92	8.46
Hs (m)	6.78	7.25	5.08	6.88	7.10	4.65	5.88
k	2.41	2.29	4.76	2.62	3.42	2.29	2.10

4.3.2 Validação do Modelo de espraio

A validação do modelo conceitual para determinação do alcance máximo do espraio consistiu na utilização de dados de levantamentos topográficos, das cotas e posição planimétrica do alcance máximo do espraio nas duas áreas de estudo, registados após a ocorrência da tempestade *Christina*.

Procedeu-se à cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos para a tempestade de referência através das duas formas distintas: tendo em conta a metodologia restrita, resultando na delimitação pela cota do máximo espraio estimada para toda a área de estudo; e pela utilização da metodologia holística, estimando o alcance máximo de espraio em cada perfil traçado, sendo esses pontos conectados de acordo com a morfologia da área de estudo.

As áreas estimadas pelos métodos descritos foram comparadas com a cartografia dos dados de campo.

5. Resultados

Este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: (i) caracterização da agitação marítima para os horizontes temporais que se pretendem cartografar; (ii) seleção da fórmula de *run-up* com dados obtidos em condições de baixa energia e de eventos extremos (tempestade *Christina*); (iii) e cartografia das áreas vulneráveis a galgamentos oceânicos.

5.1 Caracterização da agitação marítima em condições de tempestade extrema

A caracterização da agitação marítima para os horizontes temporais de 2050 e 2100 suportou diversas etapas fundamentais para a obtenção dos resultados finais. Inicialmente foi gerada uma matriz de transferência específica, para a praia das Maças (figura 16-A) e para a praia da Foz do Lizandro (figura 17-A), devido às assimetrias do fundo oceânico do litoral português que implicam a repetição deste procedimento para cada um dos diferentes locais em estudo. Nas figuras 16-B (praia das Maças) e 17-B (praia da Foz do Lizandro) foram representadas as razões entre a altura de cada onda junto à costa e a altura de cada onda ao largo (a preto) e entre a altura de cada onda na rebentação e altura da onda ao largo (a azul), verificando-se que o empolamento das ondas aumenta à medida que o rumo das ondas se aproxima da orientação perpendicular à linha de costa, 300° para a praia das Maças e 280° para a Foz do Lizandro.

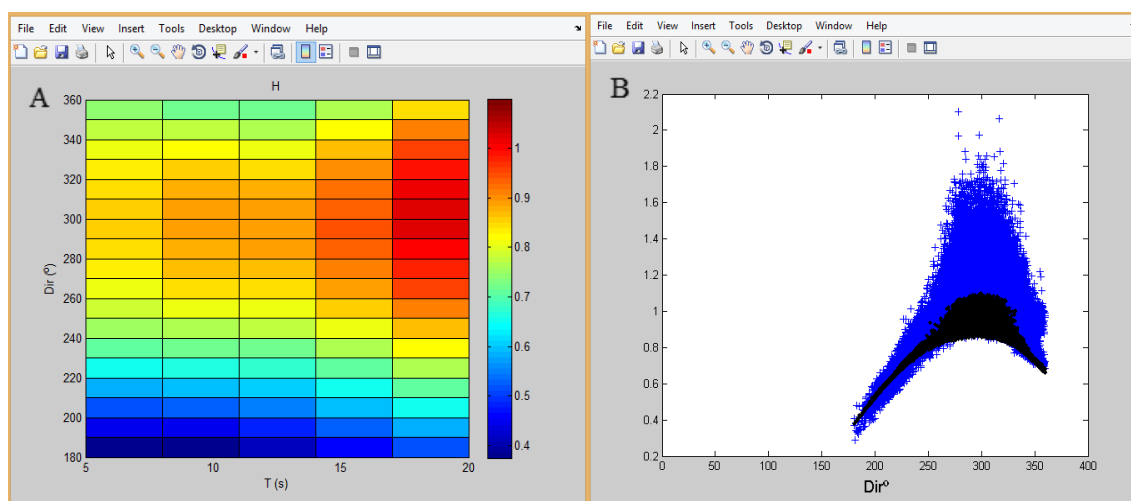


Figura 16 – A) Matriz de transferência para a praia das Maças; B) em xx o rumo das ondas e em yy a razão entre a altura de cada onda junto à costa e altura da onda ao largo (a preto) e a razão entre a altura de cada onda na rebentação e altura da onda ao largo (a azul).

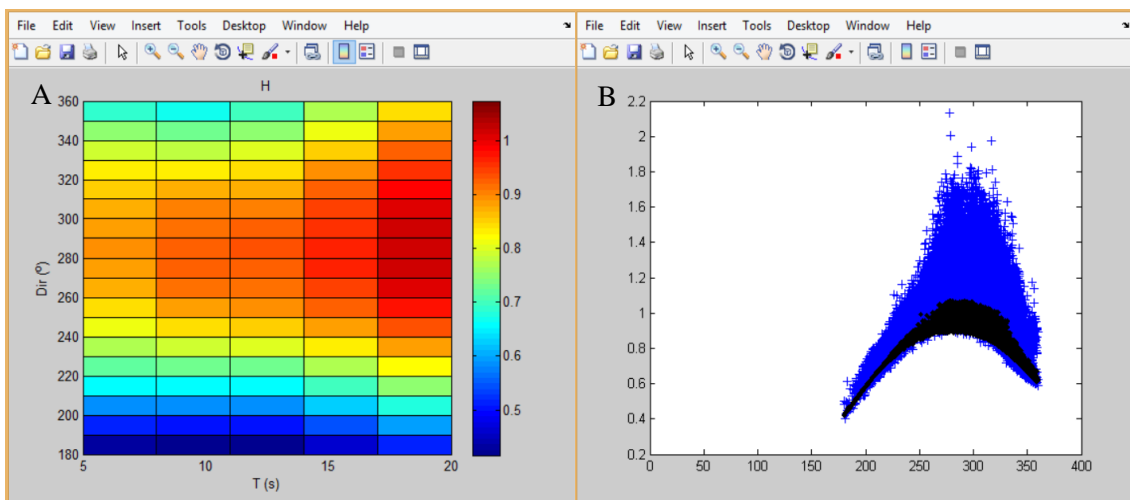


Figura 17 – A) Matriz de transferência para a praia da Foz do Lizandro; B) em xx o rumo das ondas e em yy a razão entre altura de cada onda junto à costa e altura da onda ao largo (a preto) e a razão entre a altura de cada onda na rebentação e altura da onda ao largo (a azul).

As figuras 18 e 19 apresentam os resultados obtidos da transformação dos parâmetros das ondas na rebentação para parâmetros de ondas ao largo (as mesmas ondas mas sem os efeitos da refração) na Praia das Mações e na praia da Foz do Lizandro respetivamente. Nestes foram projetadas as alturas significativas e períodos de pico correspondentes bem como a linha de tendência logarítmica que melhor se ajustou aos dados.

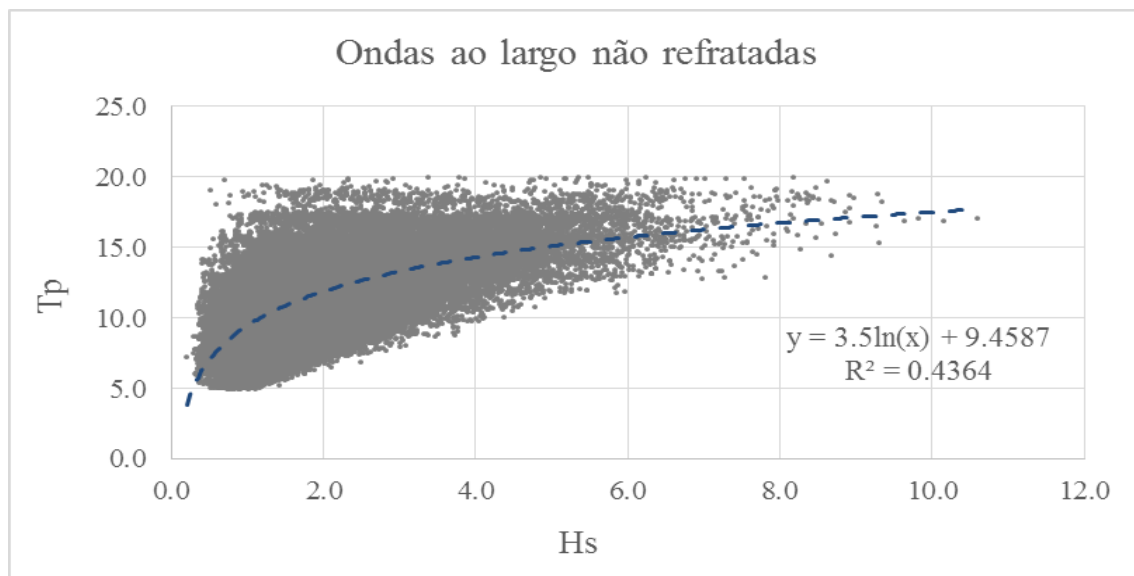


Figura 18 - Ondas ao largo não refratadas para a praia das Mações.

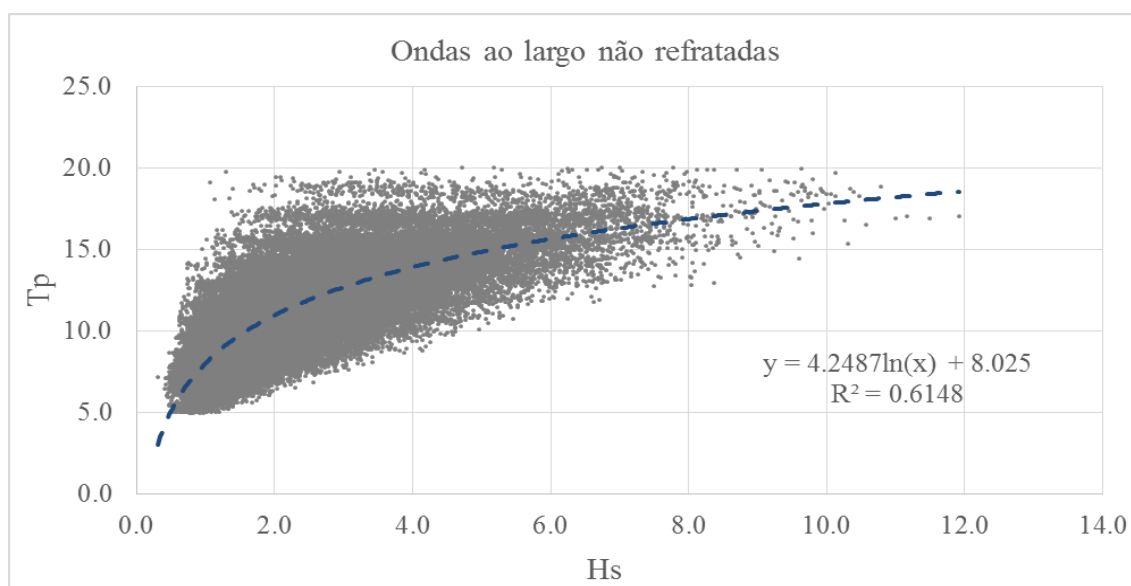


Figura 19 - Ondas ao largo não refratadas para a praia da Foz do Lizandro.

A cota do máximo espraio é influenciada pelas ondas que têm maior amplitude em condições de eventos extremos, estes assumem um comportamento aproximadamente cíclico ao longo do tempo, possibilitando assim a previsão e prevenção de eventos extremos futuros através do cálculo das características das ondas para determinados períodos de retorno.

Os cenários de eventos extremos selecionados foram: tempestade Christina, funcionando como uma tempestade de referência para a validação dos resultados; tempestade extrema para o horizonte temporal de 2050; e tempestade extrema para o horizonte temporal de 2100. Para os horizontes temporais de 2050 e 2100 estimaram-se ondas com períodos de retorno de 35 e 85 anos respectivamente, todavia o programa do MATLAB apenas calcula a altura de onda associada a cada período de retorno, recorrendo-se portanto à equação da linha de tendência dos gráficos acima para obter os períodos de pico associados, tabela 4.

Tabela 4 – Características da agitação marítima para os período de retorno de 35 e 85 anos nas áreas de estudo.

Período de retorno	Praia da Foz do Lizandro		Praia das Maças	
	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
35 anos	10.6	18.0	10.6	17.7
85 anos	11.5	18.4	11.5	18.0

5.2 Escolha da fórmula de *run-up*

Para a validação dos modelos de espraio procedeu-se à aplicação dos mesmos em dois casos distintos: em condições de agitação marítima de baixa energia (dados de campo recolhidos nas áreas de estudo) e em condições de agitação marítima de um evento extremo (dados recolhidos pela ARH/Tejo referentes à tempestade *Christina*).

5.2.1 Praia Grande

Dos dados recolhidos durante a campanha, optou-se por analisar um intervalo de tempo onde houvesse o maior conjunto de dados possíveis, por forma a maximizar a relevância dos mesmos. Deste modo a análise dos dados concentrou-se no período entre as 16:15h e as 16:45h do dia da campanha. A análise dos perfis de praia (figura 20) mostra que esta apresenta uma morfologia diferenciada.

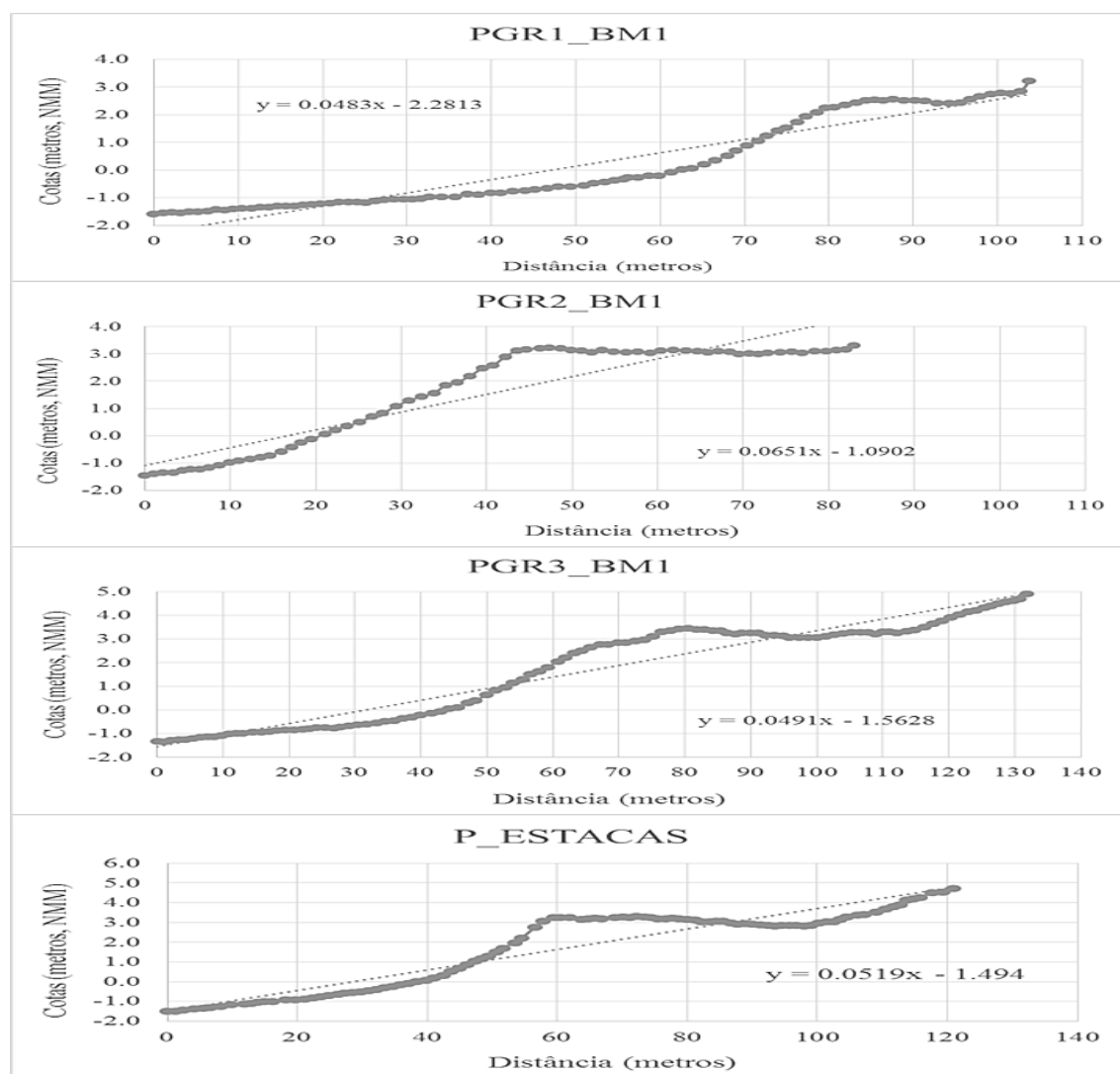


Figura 20 – Perfis da praia Grande de norte para sul.

O declive da praia Grande varia entre 0.048 e 0.065 optando-se por utilizar um declive constante da praia de 0.06.

Através do *software* ViewADP Pro[®] foram recolhidos os dados de altura significativa da onda e período de pico entre as 10:30h e as 18:15h, revelando que a agitação marítima junto à costa apresentava um rumo médio de 240°, altura significativa variável entre 0.65 e 0.85 metros e períodos de pico entre 6 a 9 segundos (figura 21).

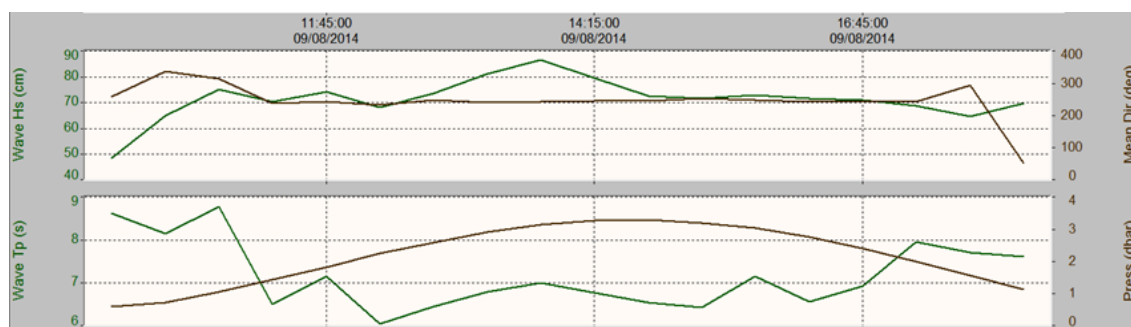


Figura 21 – Registo de dados oceanográficos no mini-ADP entre as 10:30h e as 18:15h.

Os valores de H_s e T_p medidos pelas 16:15h eram de 0.71 metros e 6.6 segundos, sendo ligeiramente diferentes pelas 16:45h onde se registou H_s de 0.709 metros e T_p de 6.9 segundos, para caracterizar este intervalo de tempo calculou-se as respetivas médias de 0.71 metros de altura significativa e 6.75 segundos de período de pico.

O tratamento dos dados dos transdutores PT_70 e PT_72 também forneceram informação da altura significativa e respetivo período médio, os aparelhos apresentam valores diferentes devido à distância a que se encontravam um do outro, sendo que o PT_70 se encontrava mais perto da zona de rebentação neste intervalo de tempo. A análise em frequência (em MATLAB) e a análise temporal (em Excel) das ondas registadas entre as 16:28h e as 16:40h revelou ligeira diferença no período de onda, devendo-se à forma como foi determinado em cada método. No MATLAB (com base nos procedimentos de Kamphuis (2010)), o foi referente ao período de pico (T_p) e ao período médio de zeros (T) e no Excel representou o período médio do terço das ondas mais altas (T). Na tabela 5 estão discriminados os valores obtidos pelos dois métodos.

Tabela 5 - Características das ondas registradas pelos transdutores entre as 16:28h e as 16:40h.

		PT_70	PT_72
MATLAB	Hs (m)	0.68	0.68
	Tp (s)	7.29	7.29
	T (s)	6.24	6.24
EXCEL	Hs (m)	0.54	0.51
	T (s)	7.50	6.72

A figura 22 representa os 103 espraços consecutivos registrados entre as 16:28h e as 16:40h, sendo-se a média de 2% dos espraços mais altos ($R_{2\%}$) aproximadamente 1.49 metros referente o NMM.

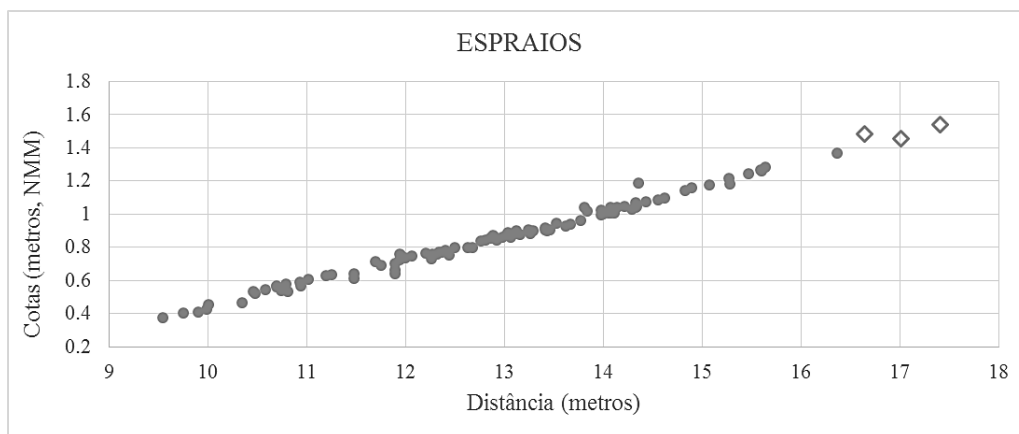


Figura 22 - Representação gráfica dos espraços medidos na praia Grande entre as 16:28h e as 16:40h.

Com intuito de estudar as características do espraço das ondas num local específico da face de praia, utilizou-se uma sequência (10 minutos) de imagens de vídeo retificadas onde se isola uma linha de pixels transversal à praia no local coincidente com a medição dos espraços, criando-se uma imagem do perfil ao longo do tempo (*timestack*) através da amostragem de uma série temporal da intensidade luminosa de um ou mais *pixels* da imagem, figura 23.

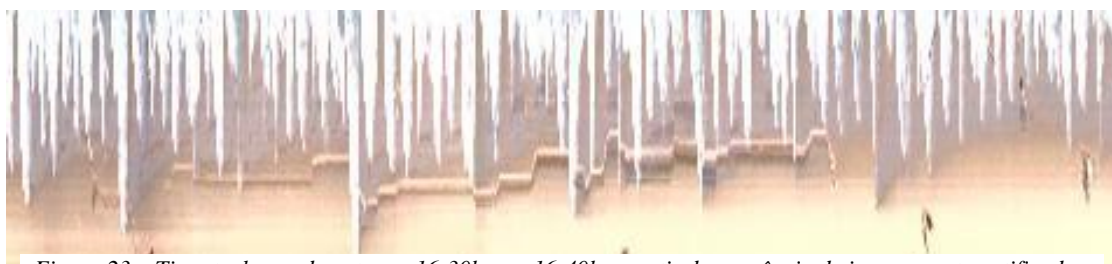


Figura 23 – Timestack gerada entre as 16:30h e as 16:40h a partir da sequência de imagens orto-retificadas.

Com a *timestack* produzida procedeu-se de forma a obter o $R_{2\%}$, através de um código criado em MATLAB para o efeito. Para tal, georreferenciou-se a *timestack* para que no eixo do yy fosse dada uma distância que associada ao perfil da praia entre os dois pontos da figura 15 geram o valor da cota correspondente em determinado ponto selecionado na imagem; no eixo do xx encontra-se o tempo sendo que cada linha de *pixels* corresponde a um segundo. Com a imagem referenciada marcaram-se os máximos de cada espraio, identificados pelas extremidades brancas na figura 24-A, que transformados em cotas geraram a figura 24-B dando um valor aproximado de $R_{2\%}$ de 1.47 metros.

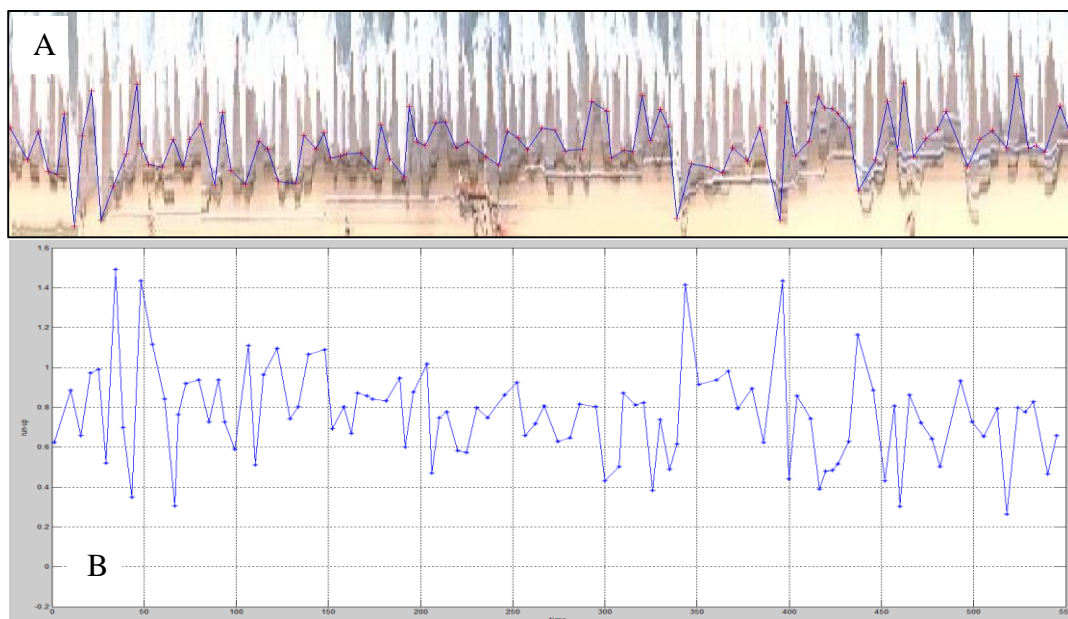


Figura 24 – A) Marcação dos espraio na timestack; B) Representação gráfica dos espraio.

A diferença entre o $R_{2\%}$ determinado a partir do GPS-RTK e da vídeo-monitorização foi cerca de dois centímetros, o que é aceitável devido aos erros associados à aquisição de dados por cada um dos métodos.

A avaliação da importância da componente infragravítica foi testada com os dados recolhidos com auxílio do transdutor PT_70, através da análise espectral de intervalos de 10 minutos de dados (anexo B). Na figura 25-A encontra-se projetada a razão entre a altura significativa da onda infragravítica e a altura significativa da onda gravítica ao longo do tempo, enquanto na figura 25-B apresenta-se a mesma razão em função da profundidade.

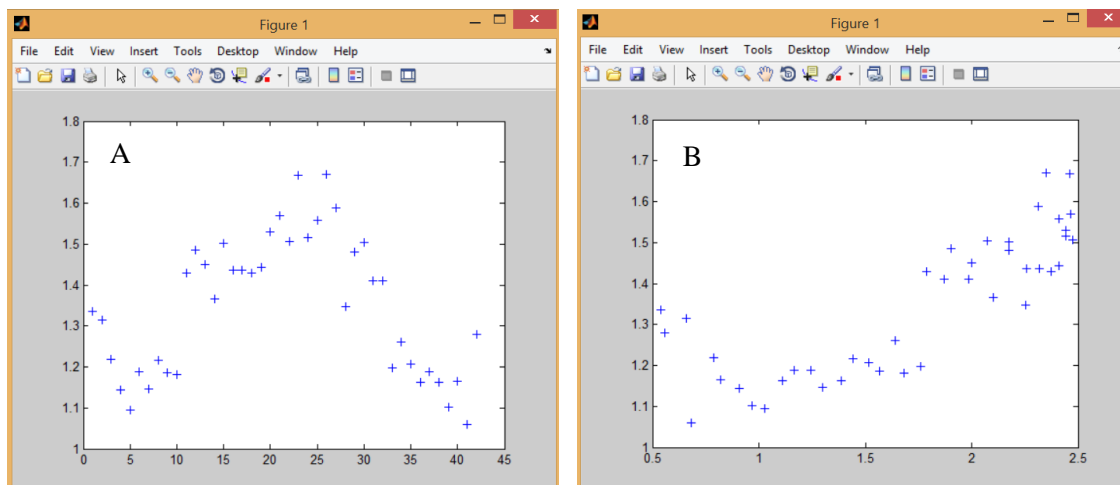


Figura 25 – A) xx intervalos de 10 minutos, e yy relação entre altura significativa da onda infragravítica e a altura significativa da onda gravítica; B) xx profundidade, e yy relação entre altura significativa da onda infragravítica e a altura significativa da onda gravítica.

Através da análise do gráfico constatou-se que a separação em ondas de baixa e alta frequência revelou que a altura da onda infragravítica é superior à altura da onda gravítica durante todo o período de recolha de dados, quando o transdutor se a maior profundidade a razão entre as duas componentes aumentou sendo máxima durante a preia-mar.

A análise espectral foi também realizada com os dados do mini_ADP (anexo B) no *software* ViewADP Pro®, no entanto os resultados não foram apresentados devido a um problema identificado na representação dos mesmos.

5.2.2 Praia da Foz do Lizandro

Os dados topográficos obtidos com o GPS-RTK foram projetados graficamente para melhor interpretação do perfil da praia ao longo da costa, do mesmo modo que os perfis da praia Grande, figura 26.

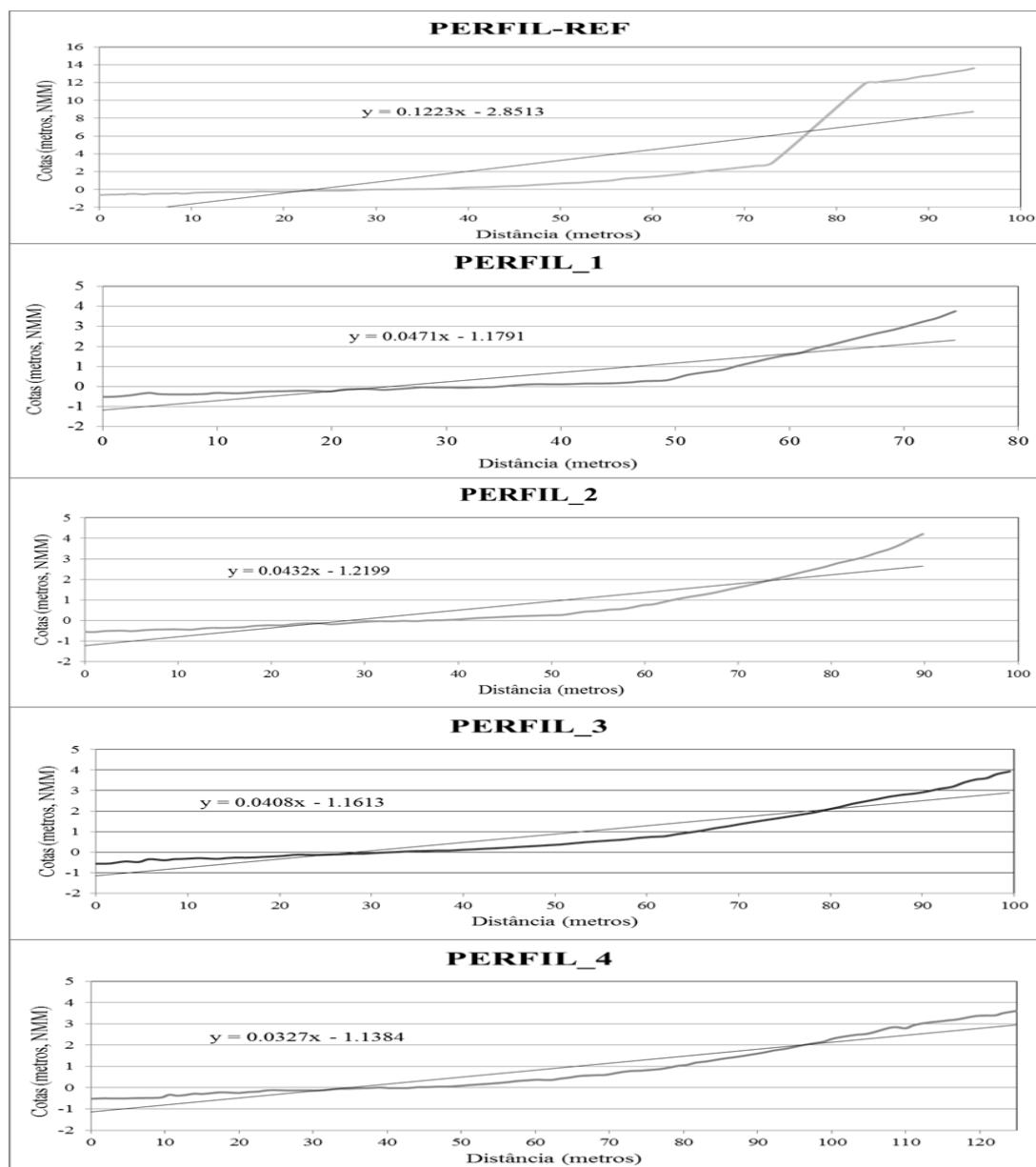


Figura 26 – perfis da praia da Foz do Lizandro de norte para sul.

Através da figura 26 observou-se que a extensão da praia entre o perfil de referência e o perfil 5 apresenta forma côncava possivelmente devido à maior exposição à ondulação. A inclinação média da praia variou entre os 3% e os 5% aproximadamente, entre o terraço de baixa-mar e a base da escarpa de erosão.

O levantamento dos cem espraços apresenta uma ligeira dispersão lateral, no entanto representaram-se graficamente em Excel pelo mesmo método que os perfis topográficos, extraíndo-se o declive da zona onde se registaram os espraços (0.0169) e a cota atingida por 2% dos espraços registados, figura 27. As duas maiores cotas atingidas pelos espraços medidos foram de -0.156 metros (equivalente à cota de $R_{2\%}$) e de -0.166 metros (correspondente à cota do máximo espraço).

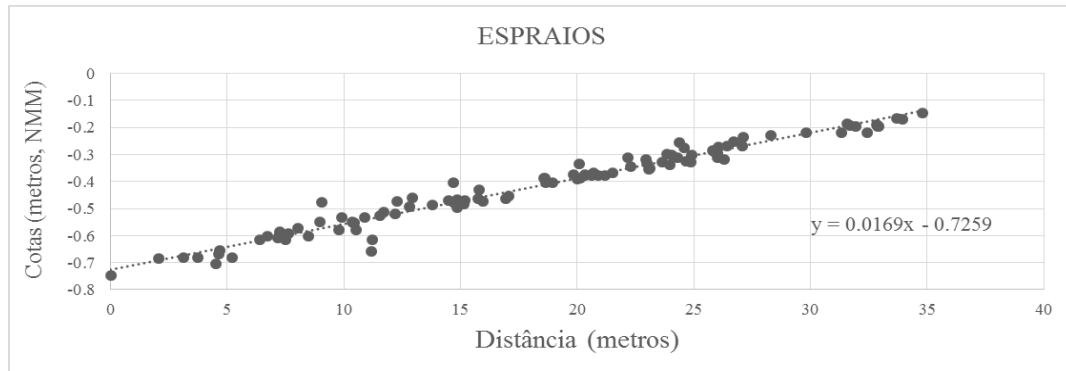


Figura 27 - Representação gráfica dos espraços medidos na Foz do Lizandro.

A altura significativa da onda na rebentação (H_b) obteve-se através da diferença entre a cota da onda retirada no campo através do método de Bascom (1.48 metros) e o nível médio do mar previsto durante a baixa-mar (-0.81 metros relativo ao NMM), verificando-se um H_b de 2.29 metros. O período (T) correspondente a H_b não foi medido durante a campanha pelo que se optou por analisar os registos da boia-ondógrafo de Leixões em condições de H_b idênticos ao determinado e adaptar um período médio relativo a outros dias de registo com agitação com a mesma altura, tendo-se registado um período de 7.1 segundos.

5.2.3 Aplicação às condições de baixa energia

De modo a validar e calibrar as fórmulas de *run-up* estudadas para a área de estudo da praia Grande, testou-se a correspondência entre os parâmetros das ondas registadas pelo transdutor PT_70 situado junto à rebentação e o espraço (medidos com o GPS-RTK e pela vídeo-monitorização). A agitação incidente entre as 16:30h e as 16:40h encontra-se descrita na tabela 6, assumindo um rumo perpendicular à linha de costa pela observação das imagens da vídeo-monitorização. A cota da maré, durante este período, encontrava-se a cerca de 0.30 metros acima do NMM segundo o registo do marégrafo de Cascais e as cotas de *run-up* atingidas por 2% das ondas oscilaram entre os 1.470 metros e 1.494

metros de acordo com as medições da vídeo-monitorização e do GPS-RTK respetivamente.

No caso da praia da Foz do Lizandro a relação entre o forçamento e o espraio foi estabelecida, tal como para a praia Grande, através da aplicação das fórmulas estudadas utilizando o registo de ondas observadas durante a campanha e o respetivo *run-up* medido no campo pelo GPS-RTK, tabela 6. A cota da maré, pelas 11:20h, encontrava-se a cerca de -0.81 metros em relação ao NMM segundo a tabela de previsão de marés para Cascais e o *run-up* atingido por 2% das ondas rondou os 0.654 metros.

Tabela 6 – Agitação nos locais de estudo.

parâmetro	PG	FL
Hb (m)	0.68	2.29
T (s)	7.20	7.10
α (°)	0.0	0.0
$\tan \beta$	0.060	0.017
Db (m)	0.88	2.94
Hs (m)	0.57	2.12

Na tabela 7 sintetizam-se os valores de *run-up* estimados por cada modelo e também o $R_{2\%}$ e o R_{\max} medidos no campo nos dois locais de estudo para permitir uma melhor comparação. As figuras 28 e 29 mostram de uma forma mais perceptível quais os modelos que se aproximam mais dos valores medidos na praia Grande e na Foz do Lizandro respetivamente.

Tabela 7 – *Run-up* estimado pelos modelos analíticos para as praias Grande e Foz do Lizandro.

Modelo	Hs	Tp	$\tan \beta$	Run-up (metros)	
				PG	FL
Guza e Thornton (1982) , Rs	x	-	-	0.40	1.48
CERC (1995) , $R_{2\%}$	x	-	-	0.74	2.76
Teixeira (2009) , R_{\max}	x	-	-	1.07	2.32
Hunt (1959) , $R_{2\%}$	x	-	x	0.27	0.29
Holman (1986) , $R_{2\%}$	x	x	x	0.37	0.20
Mase (1989) , $R_{2\%}$	x	x	x	0.83	0.78
Stockdon et al. (2006) , $R_{2\%}$	x	x	x	0.44	0.54
$R_{2\%}$ medido				1.19	0.65
R_{\max} medido				1.24	0.66

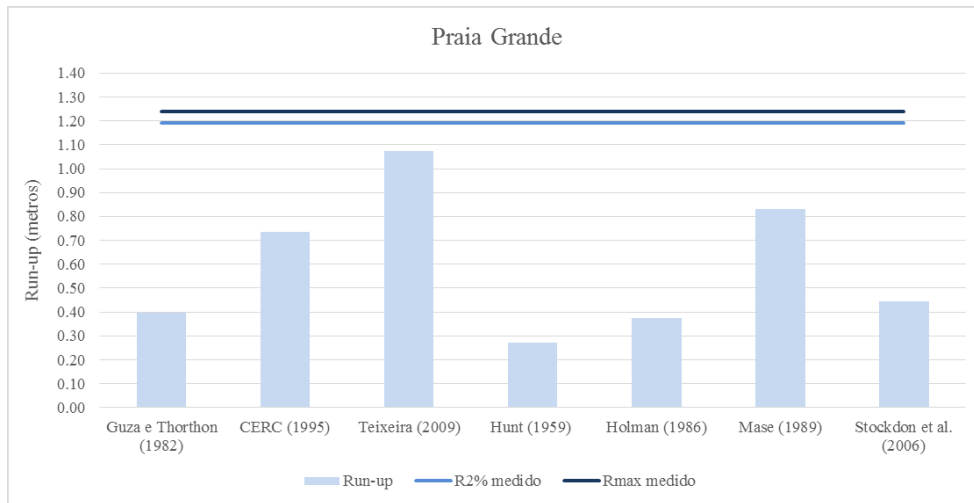


Figura 28 – Comparação dos valores de run-up estimados por cada modelo para a praia Grande em condições médias de agitação marítima.

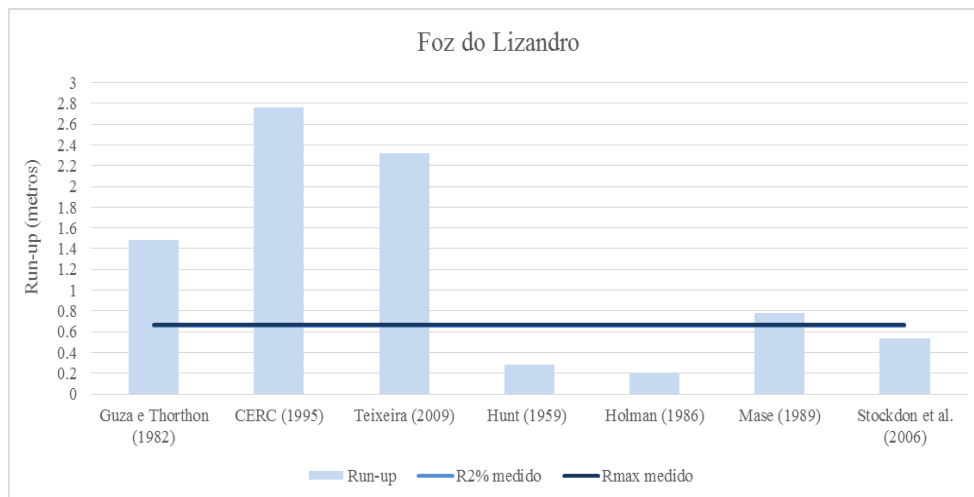


Figura 29 - Comparação dos valores de run-up estimados por cada modelo para a praia da Foz do Lizandro em condições médias de agitação marítima.

Os modelos que mais se aproximaram do *run-up* medido na praia Grande foram Teixeira (2009) e Mase (1989), embora este último apresente uma diferença de aproximadamente 30% abaixo do $R_{2\%}$ medido. Na praia da Foz do Lizandro os modelos que estimaram valores de *run-up* mais próximos dos observados foram Stockdon et al. (2006) e Mase (1989), com diferenças respetivamente de 30% abaixo e 20% acima do $R_{2\%}$ medido. O modelo de Masselink e Hughes (2003) não foi considerado visto que a calibração da constante k foi efetuada com o valor de *run-up* medido.

5.2.4 Aplicação à tempestade *Christina*

Com os dados de agitação marítima e declive de cada praia monitorizada foi possível determinar o *run-up*, através das fórmulas teóricas aqui estudadas, e comparar esses valores com os valores de máximo espraio medidos no campo, por forma a averiguar qual delas apresenta uma maior concordância com as observações (tabela 8).

Tabela 8 - Cálculo do *run-up* através dos modelos estudados para as diferentes praias monitorizadas.

Modelo	PN	PV	NZ	PDR	SC	FT	LA
Guza e Thornton (1982) , Rs	4.75	5.08	3.56	4.82	4.97	3.26	4.12
CERC (1995) , R2%	8.81	9.43	6.60	8.94	9.23	6.05	7.64
Teixeira (2009) , Rmax	6.04	6.42	4.68	6.12	6.30	4.34	5.32
Hunt (1959) , R2%	5.15	5.80	5.28	4.40	7.38	3.72	7.06
Holman (1986) , R2%	4.43	4.86	4.07	3.52	6.17	3.82	5.98
Mase (1989) , R2%	9.90	10.77	8.57	8.44	12.68	7.97	11.74
Stockdon et al. (2006) , R2%	4.51	4.88	3.88	3.77	5.88	3.84	5.58
Rmáx medido	8.77	9.54	5.15	7.41	7.52	7.32	8.73

O modelo de Mase (1989) revela grande concordância com as medições efetuadas, e o modelo CERC (1995) também apresenta uma grande proximidade. Os valores de *run-up* calculados a partir da fórmula de Stockdon et al. (2006) revelaram-se significativamente mais baixos em comparação com os observados no campo, levando a uma tentativa de calibração da mesma (tabela 9). Este ajuste da fórmula foi realizado através de um processo de regressão não linear em MATLAB, obtendo-se coeficientes para cada componente (*set-up*, componente gravítica e componente infragravítica) isoladamente, proporcionando uma diferença mínima possível entre os valores de *run-up* medidos no campo e os obtidos pela fórmula (tabela 10). No seguimento do trabalho esta calibração encontra-se denominada por Stockdon Modificada (2015).

$$R_{\text{máx}} = 1.1 \left[\frac{[H_s * L_0 (6.350 * (\tan\beta)^2 + 0.053)]^{\frac{1}{2}}}{2} \right]$$

Tabela 9 – Relação entre a fórmula de Stockdon et al. (2006) e a sua calibração Stockdon Modificada (2015).

Modelo	Set-up	C. Gravítica	C. Infragravítica
Stockdon et al. (2006)	$0.35 \tan \beta * (H_s L_0)^{1/2}$	$0.75 \tan \beta * (H_s L_0)^{1/2}$	$0.06 * (H_s L_0)^{1/2}$
Stockdon Modificada (2015)	---	$2.52 \tan \beta * (H_s L_0)^{1/2}$	$0.23 * (H_s L_0)^{1/2}$

Tabela 10 – Comparação entre a fórmula de Stockdon et al. (2006) e a sua calibração Stockdon Modificada (2015) com os run-up's medidos nas diferentes praias monitorizadas.

Modelo	PN	PV	NZ	PDR	SC	FT	LA
Stockdon et al. (2006)	4.51	4.88	3.88	3.77	5.88	3.84	5.58
Stockdon Modificada (2015)	8.70	9.43	4.98	7.67	7.51	7.48	8.67
R _{máx} medido	8.77	9.54	5.15	7.41	7.52	7.32	8.73

Na perspetiva de melhorar o ajuste das estimativas aos valores de *run-up* medidos no foi ainda ensaiado o desenvolvimento de uma nova expressão que relaciona as condições de agitação incidente e declive da praia com o *run-up* máximo:

$$R_{máx} = \alpha_1 * Hs^{\alpha_2} * Tp^{\alpha_3} * (\tan\beta)^{\alpha_4}$$

onde,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - coeficientes empíricos.

A determinação destes quatro coeficientes empíricos foi realizada através de processo de regressão linear em MATLAB tendo sido deduzida a seguinte equação:

$$R_{máx} = 1.063 * Hs^{0.525} * Tp^{0.773} * (\tan\beta)^{0.409}$$

Na tabela 11 representam-se os valores de *run-up* estimados pela fórmula otimizada e os medidos nas diferentes áreas monitorizadas, verificando-se diferenças muito reduzidas, como seria expectável considerando o número e praias e o número de parâmetros estimados.

Tabela 11 – Comparação entre os resultados calculados pela fórmula otimizada e os run-up's medidos nas diversas praias monitorizadas.

Modelo	PN	PV	NZ	PDR	SC	FT	LA
fórmula otimizada	8.76	9.45	5.09	7.84	7.31	7.43	8.58
R _{máx} medido	8.77	9.54	5.15	7.41	7.52	7.32	8.73

A escolha dos modelos a utilizar para a cartografia das áreas vulneráveis a galgamentos oceânicos foi suportada nos que apresentaram o menor erro, para tal determinou-se o erro médio quadrático, erro médio absoluto, índice de concordância de Willmott, coeficiente de correlação de Pearson e índice de confiança para cada modelo (tabela 12).

Tabela 12 – Determinação do erro médio quadrático (EMQ), erro médio absoluto (VIES), índice de concordância de Willmott (IC), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de confiança (C) para cada modelo.

Modelo	EMQ	VIES	IC	r	C
Guza e Thornton (1982)	12.816	3.415	0.400	0.593	0.237
CERC (1995)	1.459	1.031	0.754	0.593	0.447
Teixeira (2009)	5.858	2.172	0.510	0.593	0.303
Hunt (1959)	7.416	2.272	0.429	0.260	0.112
Holman (1986)	11.242	3.085	0.407	0.374	0.152
Mase (1989)	7.380	2.233	0.463	0.483	0.224
Stockdon et al. (2006)	11.350	3.157	0.413	0.479	0.198
Stockdon Modificada (2015)	0.021	0.120	0.997	0.994	0.991
fórmula otimizada	0.039	0.151	0.994	0.989	0.983

Pela análise da tabela constatou-se que as duas novas fórmulas apresentam menores erros e consequentemente melhores índices de confiança e concordância em comparação com os modelos já existentes que foram analisados. Esta interpretação permitiu identificar que o melhor modelo para realizar os cálculos de *run-up* seria Stockdon modificada (2015).

5.3 Validação do modelo de espraio

A validação do modelo conceitual consistiu na aplicação da metodologia restrita e da metodologia holística às praias da Foz do Lizandro e das Maças. Para representar cartograficamente os resultados da metodologia holística necessitou-se de traçar previamente no ArcMap 10.2, para cada área de estudo, o número de perfis que se considerassem representativos da variação morfológica ao longo da linha de costa, paralelos entre si e transversais à linha de costa. Para tal foram marcados seis perfis na praia da Foz do Lizandro e quatro perfis na praia das Maças, julgando-se ser os aceitáveis para cartografar cada local, porém quanto maior o número de perfis traçados ao longo da linha de costa, melhor seria a delimitação das áreas vulneráveis.

A cota do máximo espraio foi determinada a partir do somatório de três fatores condicionantes, o *run-up*, estimado pela fórmula de Stockdon modificada (2015); o valor da preia-mar (1.36 metros); e sobre-elevação meteorológica (0.03 metros).

Utilizaram-se dados de campo recolhidos no dia após a tempestade *Christina* (Diogo, 2014), onde foi delimitado o alcance máximo do espraio nas áreas de estudo, para validar os resultados estimados pelo modelo de *run-up*, bem como observações adicionais (Pinto,

2014) que permitiram identificar outras zonas atingidas pelo espraio. Estes dados revelaram que as cotas estimadas pela metodologia holística encontravam-se ligeiramente sobre-elevadas em relação às cotas medidas no campo. Desta forma, optou-se por introduzir um coeficiente de correção (calculado a partir da correlação entre valores estimados e medidos) para cada local de estudo, tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Relação entre as cotas estimadas e medidas na praia da Foz do Lizandro.

perfil	cota medida	cota estimada
trans9_L	9.00	10.28
trans10_L	9.90	11.16
trans11_L	8.71	8.67
trans12_L	7.75	9.23
trans13_L	6.68	8.23
trans14_L	6.90	8.23
f. correção	0.8779 * cota estimada	

Tabela 14 – Relação entre as cotas estimadas e medidas na praia das Maças.

perfil	cota medida	cota estimada
trans_macas5	7.82	8.41
trans_macas6	8.16	8.60
trans_macas7	6.7	7.9
trans_macas8	7.37	7.5
f. correção	0.9271 * cota estimada	

Nas tabelas 15 e 16 encontram-se representados as cotas estimadas por cada metodologia, na praia da Foz do Lizandro e na praia das Maças respetivamente.

Tabela 15 – Cotas estimadas por cada metodologia para a tempestade Christina na praia da Foz do Lizandro.

perfil	cotas (metros)	
	Metodologia restrita	Metodologia holística
trans9_L	9.9	9.56
trans10_L		9.83
trans11_L		8.08
trans12_L		7.94
trans13_L		7.25
trans14_L		7.21

Tabela 16 – Cotas estimadas por cada metodologia para a tempestade Christina na praia das Maças.

perfil	cotas (metros)	
	Metodologia restrita	Metodologia holística
trans_macas3	8.69	7.71
trans_macas4		7.30
trans_macas5		7.69
trans_macas6		7.82
trans_macas7		7.77
trans_macas8		4.51

As figuras 30 e 31 representam cartograficamente os valores apresentados nas tabelas anteriores, permitindo uma melhor interpretação das diferenças entre as duas metodologias pois inclui o alcance horizontal do espraio.

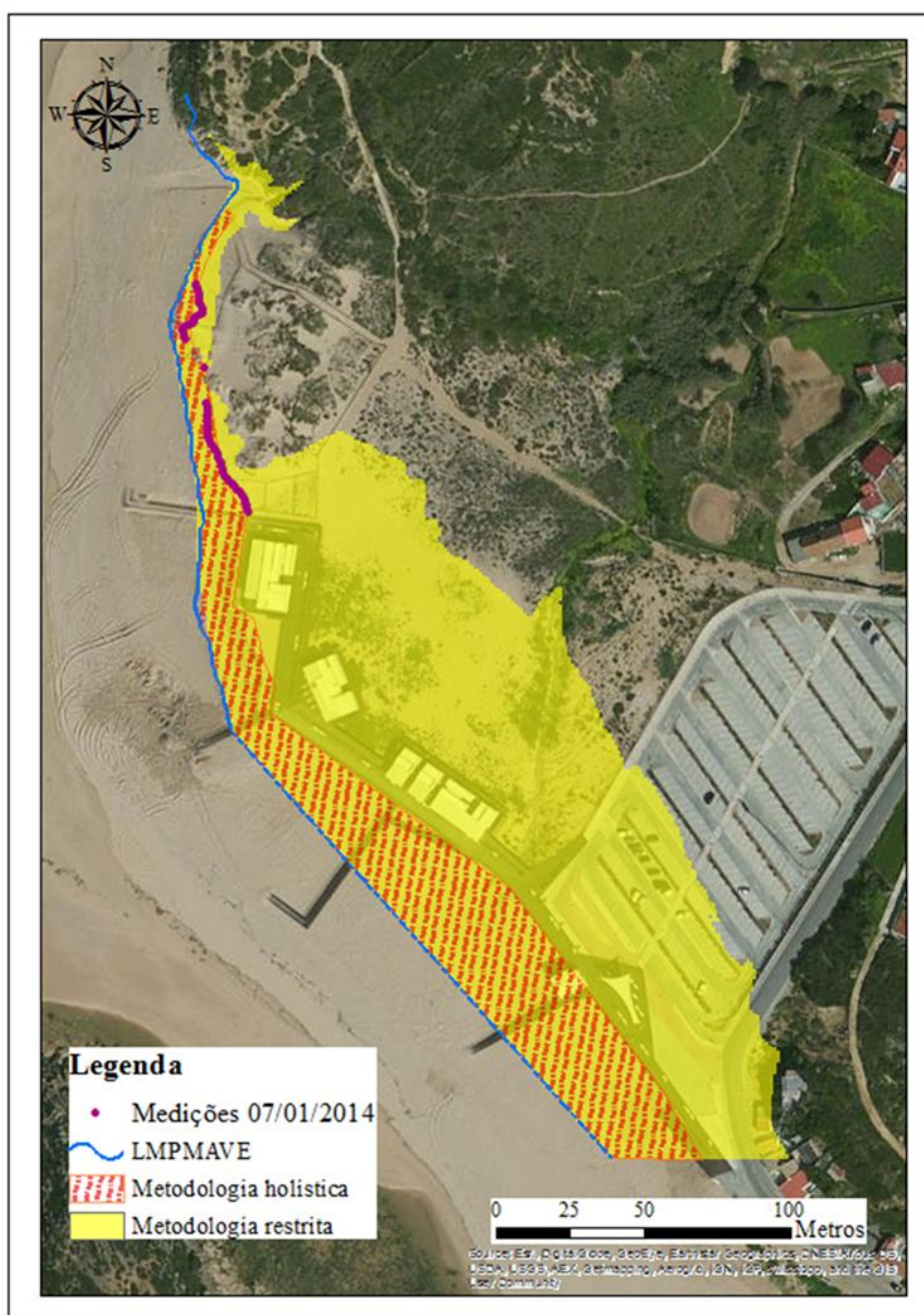


Figura 30 – Comparação cartográfica entre os resultados obtidos por cada metodologia na praia da Foz do Lizandro.

Como pode ser observado na figura 30, na cartografia pela Metodologia holística, o espraio das ondas durante a tempestade *Christina* não transpôs a crista da duna na zona norte da área de estudo e na restante zona, onde a praia é delimitada por passadiços de madeira, também não houve o galgamento destes. Segundo a Metodologia restrita, todos os apoios de praia e uma parte do parque de estacionamento seriam afetados pelo espraio.

As observações realizadas no dia após a tempestade *Christina* constataram que o espraio não galgou o passadiço, que se encontra a cotas um pouco mais elevadas, e o levantamento topográfico demonstrou que a duna não foi transposta. Estes resultados confirmam que a estimativa da metodologia holística se aproxima mais das observações e a inadequabilidade da representação pela metodologia restrita.

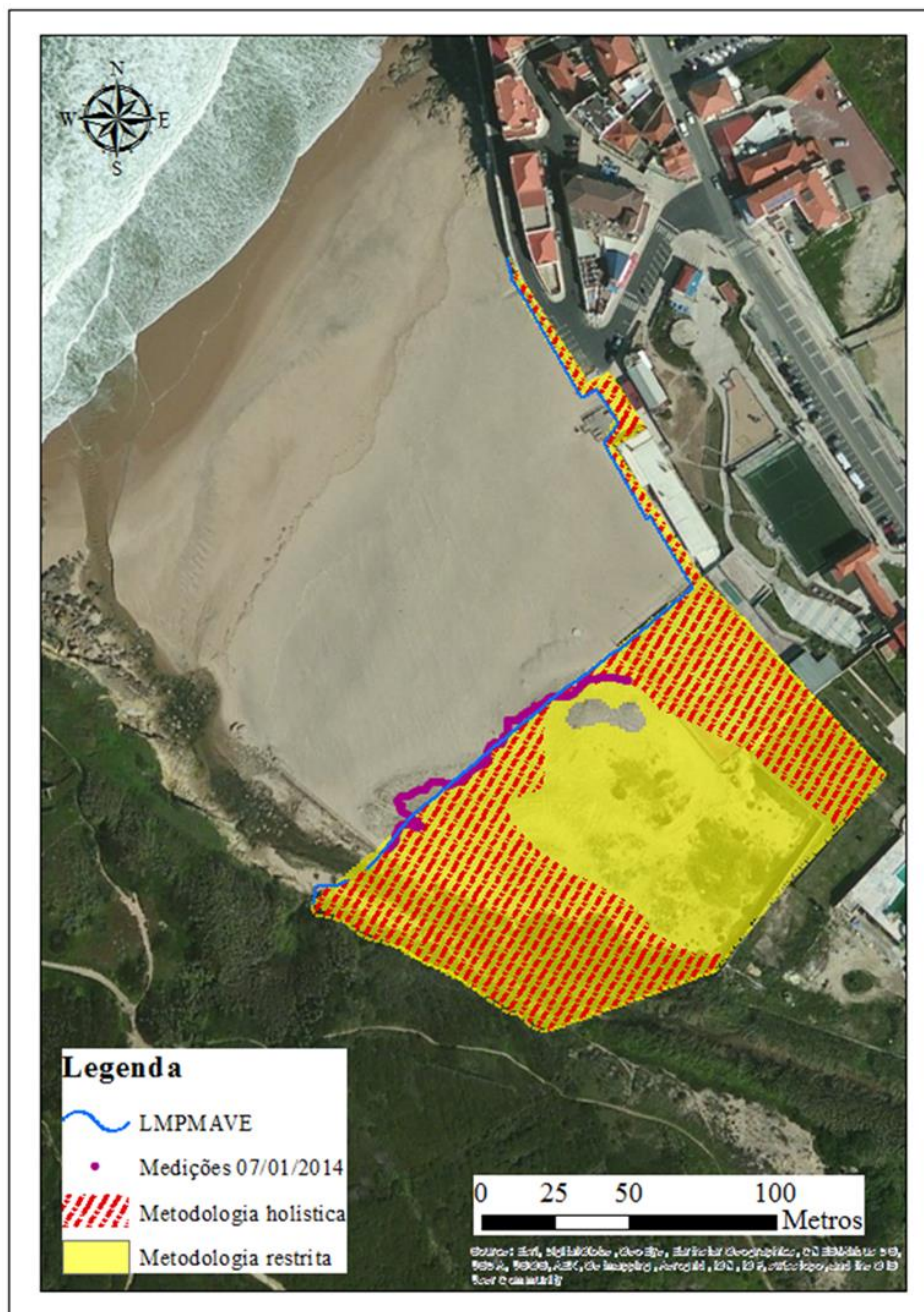


Figura 31 – Comparação cartográfica entre os resultados obtidos por cada metodologia na praia das Mações.

A metodologia holística estimou galgamento na zona dos apoios de praia e campos de ténis, verificando-se o mesmo na zona da ribeira (a sul). A região da duna apresenta dois comportamentos distintos: na área a ENE não há galgamento para lá da cota apical, para WSW verifica-se galgamento até ao limite da cartografia e da zona central da duna, zona esta mais elevada. De acordo com o metodologia restrita, apenas a crista da duna com cotas superiores a 8.69 metros não foi atingida pelo espraio.

Na zona dos campos de ténis verificou-se que estes não foram totalmente atingidos pelo espraio como se observa na figura 32, devendo-se à existência de obstáculos não detetados pelas imagens LiDAR. Em relação à área ocupada por duna, a região ENE apresenta uma concordância elevada entre a cartografia com a Metodologia holística e as observações. Na região WSW, esta concordância é menor, havendo maior área galgada. Esta diferença poderá estar associada a divergências entre a topografia atual da praia e a representada pelo LiDAR, ou fenómenos locais, não previstos pelo modelo, e que tenham de alguma forma atenuado o alcance do espraio.

Em ambas as praias identificou-se que a metodologia holística apresenta estimativas mais realistas do que a metodologia restrita, dando credibilidade e consistência à nova metodologia apresentada.

5.4 Cartografia das ZAM

Neste subcapítulo são apresentados os valores de máximo espraio e os mapas de cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos na praia da Foz do Lizandro e na praia das Maças, através do modelo conceitual e de acordo com a metodologia holística.

As cotas de alcance máximo do espraio foram portanto estimadas para os horizontes temporais de 2050 e 2100 através da metodologia holística, atingindo as cotas expressas nas tabelas 17 e 18 correspondentes à praia da Foz do Lizandro e praia das Maças respectivamente, no anexo C encontram-se representados os gráficos gerados para cada perfil em ambas as praias. A cartografia de ambos os locais estendeu-se em direção a terra até à existência de um obstáculo que impedisse a propagação do espraio, que no caso da praia das Maças corresponde ao muro lateral da estrada e aos muros que limitam as habitações que existem na parte alta da praia. A marcação dos pontos estimados teve em consideração o alcance vertical do espraio (cotas apresentadas nas tabelas) e o alcance horizontal dos espraio (distância percorrida pelos espraio de acordo com os gráficos).

Tabela 17 – Cálculo do alcance máximo dos espraio na praia da Foz do Lizandro para os cenários de eventos extremos apresentados.

perfil	cotas (metros)		
	referência	2050	2010
trans9_L	9.56	14.09	17.19
trans10_L	9.83	11.95	13.20
trans11_L	8.08	11.36	13.12
trans12_L	7.94	11.15	12.95
trans13_L	7.25	11.07	12.99
trans14_L	7.21	12.28	15.75

Tabela 18 – C Cálculo do alcance máximo dos espraio na praia das Maças para os cenários de eventos extremos apresentados.

perfil	cotas (metros)		
	referência	2050	2010
trans macas3	7.71	11.5	13.31
trans macas4	7.30	10.81	10.81
trans macas5	7.69	8.61	8.61
trans macas6	7.82	6.63	6.63
trans macas7	7.77	3.87	3.87
trans macas8	4.51	4.51	4.51
Até ao final do perfil			

Na figura 32, encontra-se a cartografia das áreas vulneráveis a galgamento oceânico na praia da Foz do Lizandro para tempestades com as características da tempestade *Christina* (amarelo), horizonte temporal 2050 (laranja) e horizonte temporal 2100 (vermelho). A transparência permitiu identificar que os apoios de praia, parte parque de estacionamento e algumas habitações se encontram abrangidos nas áreas vulneráveis para os horizontes temporais de 2050 e 2100, nas condições de tempestades extremas que foram estimadas.

Na figura 33, encontra-se a cartografia das áreas vulneráveis a galgamento oceânico na praia das Maças para tempestades com as características da tempestade *Christina* (amarelo) e horizonte temporal 2050 (laranja). O horizonte temporal 2100 não se encontra representado visto que os cenários menos violentos já abrangiam toda a área dentro dos limites (a tracejado) até aos quais foi realizada a cartografia de vulnerabilidade costeira, esta delimitação foi definida devido à presença de estruturas de proteção existentes (nomeadamente muros) deixando de ser possível determinar o alcance máximo dos espraços através do modelo concetual apresentado. A transparência da imagem permite identificar a vulnerabilidade dos campos de ténis e à margem dos limites da cartografia encontram-se apoios de praia também nitidamente vulneráveis aos eventos extremos.

5.4.1 Foz do Lizandro

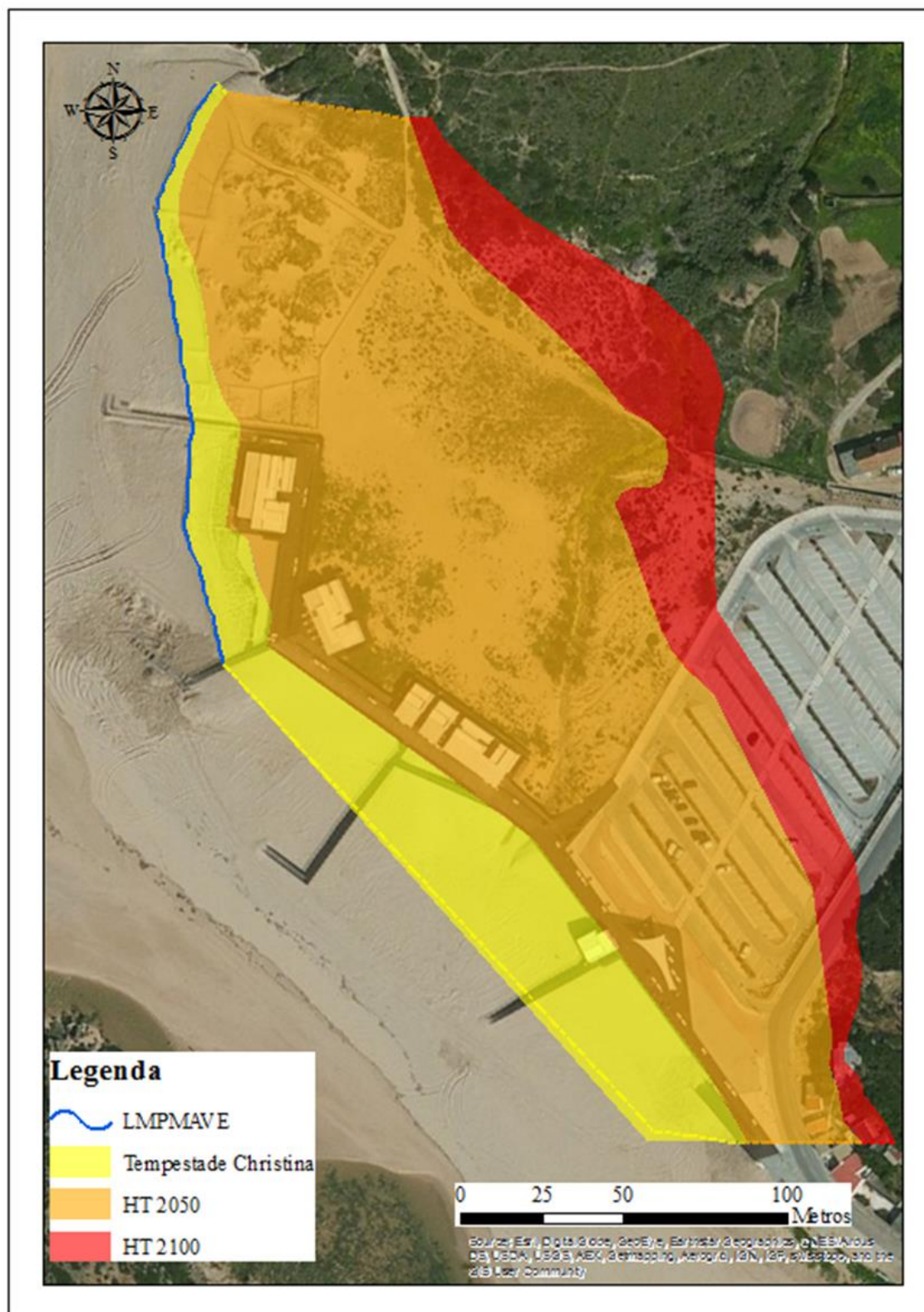


Figura 32 – Cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos na praia da Foz do Lizandro.

5.4.2 Praia das Mações



Figura 33 - Cartografia da vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos na praia das Mações.

6. Considerações finais

Neste trabalho é apresentado um método para cartografar a vulnerabilidade costeira associada a galgamentos oceânicos. Este objetivo foi concretizado através da aplicação de modelos de previsão analíticos e da cartografia dos resultados em ambiente SIG.

Nas últimas décadas surgiram diversos modelos com o intuito de avaliar o alcance vertical do espraio através do conhecimento das características das ondas (altura e período) e do declive da praia. Neste trabalho foram considerados os seguintes modelos: Guza e Thornton (1982), CERC (1995), Teixeira (2009), Hunt (1959), Battjes (1971, in Komar, 1998), Holman (1986), Mase (1989), Masselink e Hughes (2003) e Stockdon et al. (2006).

As áreas de estudo que se utilizaram para determinar o alcance máximo do espraio e respetiva cartografia da vulnerabilidade costeira foram a praia da Foz do Lizandro e a praia das Maças. A praia Grande funcionou apenas para a validação e calibração dos modelos em condições de baixa energia de agitação marítima, devido à existência de uma estrutura de proteção costeira (paredão) ao longo de toda a praia que impossibilitou a cartografia das áreas vulneráveis a galgamentos oceânicos pois as fórmulas utilizadas não determinam o galgamento em estruturas.

Através da análise dos resultados de campo obtidos em condições de baixa energia constatou-se que as fórmulas de Teixeira (2009) e Mase (1989) foram as que mais se aproximavam do *run-up* medido na praia Grande, enquanto na praia da Foz do Lizandro os modelos que melhor se ajustaram foram Mase (1989) e Stockdon (2006).

Da análise dos resultados obtidos em condições de tempestade extrema (*Christina*) nas praias de Pedras Negras, Paredes de Vitória, Nazaré, Pedras D’El Rei, Santa Cruz, Fonte da Telha e Lagoa de Albufeira, verificou-se que os modelos de Mase (1989) e CERC (1995) foram os que mais se aproximaram das medições realizadas. Contudo, optou-se por calibrar a fórmula de Stockdon et al. (2006) e desenvolver uma nova expressão que relacionasse as condições de agitação incidente e declive da praia com o *run-up* máximo. Estes dois ajustamentos, denominados “Stockdon modificada (2015)” e “fórmula otimizada” respetivamente, apresentaram menores erros e consequentemente melhores índices de confiança e concordância em comparação com os modelos já existentes que foram analisados, fator pelo qual se utilizou a primeira na determinação do alcance máximo do espraio. A calibração destes dois modelos foi realizados com poucos

dados, pelo que a utilização de um maior conjunto de dados permitiria maior precisão na calibração.

Na caracterização da agitação marítima em condições de tempestades extremas, para cada local de estudo, utilizaram-se dados de agitação marítima ao largo, entre 01 de janeiro de 1979 e 05 de maio de 2014, estas ondas quando se dirigem para a costa sofrem processos de refração que não são considerados pelas fórmulas que estimam o *run-up*. O que implicou a transformação deste grupo de ondas num grupo de ondas hipotético em a direção de propagação do largo até à costa fosse constante (não havendo refração). Para tal, o grupo de ondas inicial foi aplicado à matriz transferência de cada caso de estudo, originando o grupo de ondas correspondentes junto à costa (15 metros de profundidade, relativos ao NMM). Com base na Lei de *Snell*, o conjunto de ondas foi recalculado para a zona de rebentação e, por fim, o mesmo conjunto foi transformado em ondas ao largo não refratadas também através da Lei de *Snell*.

Aplicaram-se dois métodos distintos para estimar o alcance máximo do espraio: inicialmente adotou-se uma metodologia restrita, em que o cálculo do declive foi realizado pela inclinação média entre o NMM e a base da duna independentemente das condições de agitação marítima e do nível do mar, obtendo-se uma cota de máximo espraio; e através de uma metodologia, desenvolvida no âmbito deste trabalho e designada por holística, que inclui uma compreensão geral dos fenómenos, onde o cálculo do declive depende das ondas e do nível do mar em condições de eventos extremos e da morfologia da praia e do sistema dunar adjacente.

A cartografia, da praia da Foz do Lizandro e da praia das Mações, decorrente da aplicação destas metodologias nas condições da tempestade de referência permitiu a comparação e validação das mesmas. Os resultados da metodologia restrita baseiam-se na estimativa de uma cota de máximo espraio para toda a área de estudo, enquanto na metodologia holística consistem na estimativa do alcance máximo vertical e horizontal do espraio, constatando-se que a metodologia holística produz resultados mais próximos das observações realizadas. Esta nova metodologia, apesar de revelar resultados muito aceitáveis, necessita de alguns ajustes e calibração para que futuramente as previsões sejam ainda mais precisas.

No âmbito dos cenários de eventos extremos, optou-se por cartografar três condições: tempestade *Christina*, funcionando como uma tempestade de referência para a validação dos resultados; tempestade extrema para o horizonte temporal de 2050; e tempestade extrema para o horizonte temporal de 2100. Para cada um foi estimado o alcance vertical

e horizontal máximo do espraio a partir do somatório de quatro fatores condicionantes: o espraio das ondas, a maré astronómica, a sobre-elevação meteorológica e a subida do nível médio do mar prevista. Na praia da Foz do Lizandro verificou-se que os apoios de praia, parte do parque de estacionamento e algumas habitações se encontram vulneráveis ao galgamento oceânico nos horizontes temporais de 2050 e 2100, em condições de tempestades extremas. Na praia das Mações delimitou-se a cartografia pelos muros de proteção, contudo verifica-se que os campos de ténis e os apoios de praia estão vulneráveis a condições de agitação marítima idênticas ou mais fortes do que as registadas durante a tempestade *Christina*.

O modelo concetual proposto para a determinação do alcance máximo dos espraio desenvolvido no âmbito deste trabalho encontra-se ainda numa fase inicial, necessitando posteriormente de ser validado e calibrado noutros locais de estudo e com um maior conjunto de dados. Considera-se fundamental a existência de um modelo digital de terreno o mais atual possível para que a cartografia seja adequada, dados que podem ser adquiridos com LiDAR terrestre por exemplo. A utilização de uma fórmula de *run-up* devidamente calibrada e validada com dados de campo recolhidos no local de estudo em condições de baixa e alta energia, pode otimizar os resultados do modelo. O presente trabalho procurou avaliar a vulnerabilidade costeira em condições extremas de temporal, de acordo com o princípio da máxima precaução. No entanto, outros cenários de eventos extremos com maior probabilidade de ocorrência do que foram utilizados neste trabalho poderão ser igualmente definidos e aplicados com esta metodologia.

O presente trabalho pretendeu contribuir para o melhoramento da cartografia das ZAM com intuito de auxiliar na tomada de decisão de medidas a adotar por forma a mitigar a vulnerabilidade destas áreas.

7. Referências bibliográficas

Antunes, C. (2014) – Eventos extremos e a variação do nível do mar. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, 24-26 junho.

Bertin, X., E. Prouteau, and C. Letetrel, (2013) - A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change* 106, 77-83.

Battjes, J. A. (1971) – Run up Distributions of Waves Breaking on Slopes. *Journal of Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division, Amer. Soc. Civil Engrs.* 97 (WW1): 91-114.

Carapuço, M, Ribeiro M, Taborda R. (2014) - Assessing beach morphodynamics through close-range photomonitoring. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, 24-26 junho.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F., (2011) - 'The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, no. 656, 553–597.

Diogo, Z., Lira, C., Bastos, A., Silva, A., Carapuço, M., Taborda, R., Andrade, C., Freitas, C., (2014) - Impactos Das Tempestades Extra-Tropicais Do Inverno De 2014 Nas Praias Da APA, I.P. / ARH TEJO, 118p.

Guza, R. T. and Inman, D. L., (1975) – Edge waves and beach cups. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21), 2997-3012.

Guza, R.T. and Thornton, E.B. (1982) – Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87 (C1), pp. 483-491.

Hughes, M. and Turner, I. (1999) – “Chapter 5. The Beachface” In: *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Short, A., (ed.), John Wiley & Sons, ltd.

Holman, R.A. (1986) – Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. In Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 527-544.

Hunt, I. A. (1959) – Design of seawalls and breakwaters. Journal of Waterways and Harbours Division, 85, pp. 123-152.

Kamphuis, J. W. (2010) – Introduction to Coastal Engineering and Management, Short-Term Wave Analysis, volume 30, pp.57-87.

Komar, P. D. (1976) – Beach Processes and Sedimentation, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N J, 429 p

Larson, M., Kubota, S., Erikson L. (2004) - Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling, Marine Geology, Volume 212, Issues 1–4, pp. 61-79.

Makaske, B. and Augustinus, P.G.E.F., (1998) - Morphological Changes of a Micro-tidal, Low Wave Energy Beach Face during a Spring-Neap Cycle, Rhone-Delta, France. Jour. of Coastal Research, 14, pp. 632-645.

Mase, H. (1989) - Random wave runup height and gentle slope. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 115, 5, pp.649-661.

Mase, H. and Iwagaki, Y., (1984) – Run-up of random waves on gentle slopes. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 593-609.

Masselink, G. & Hughes, M. G. (2003) – Introduction to coastal processes and geomorphology. *Arnold*, London, 354p.

Nielsen, P. and Hanslow, D.J. (1991) – Wave Run-Up Distributions on Natural Beaches. Journal of Coastal Research, 7, 1139-1152.

Pinto, C. A. (2014) - Registo das ocorrências no litoral, temporal de 3 a 7 de janeiro de 2104, APA, 127p.

Pinto, C., et al. (2012) - Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral (PAPVL) 2012-2015, 100p.

Rahmstorf, S., M. Perrette, and M. Vermeer, (2012) – Testing the robustness of semi-empirical sea level projections. Climate Dynamics, 39, 861-875.

Saville, T., (1958) – "Wave Run-up on Composite Slopes," 6th Intl. Conf. Coastal Engr., pp. 691-699.

Simpson, D. (2005) - Gravel Beaches. In M. Schwartz (Ed.), Encyclopedia of Coastal Science SE - 159 (pp. 492–494).

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger Jr., A. H., (2006) – Empirical parameterization of setup, swash, and runup, Coastal Engineering, 53(7): 573-588.

Sutherland, J., (2010) – Guidelines on Beach Monitoring for Coastal Erosion in Concepts and Science for Coastal Erosion Management (Conscience) Project. Deliverable D15, 30pp.

Teixeira, S. B. (2009) – Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. Administração da Região Hidrográfica do Algarve. Faro, 207p.

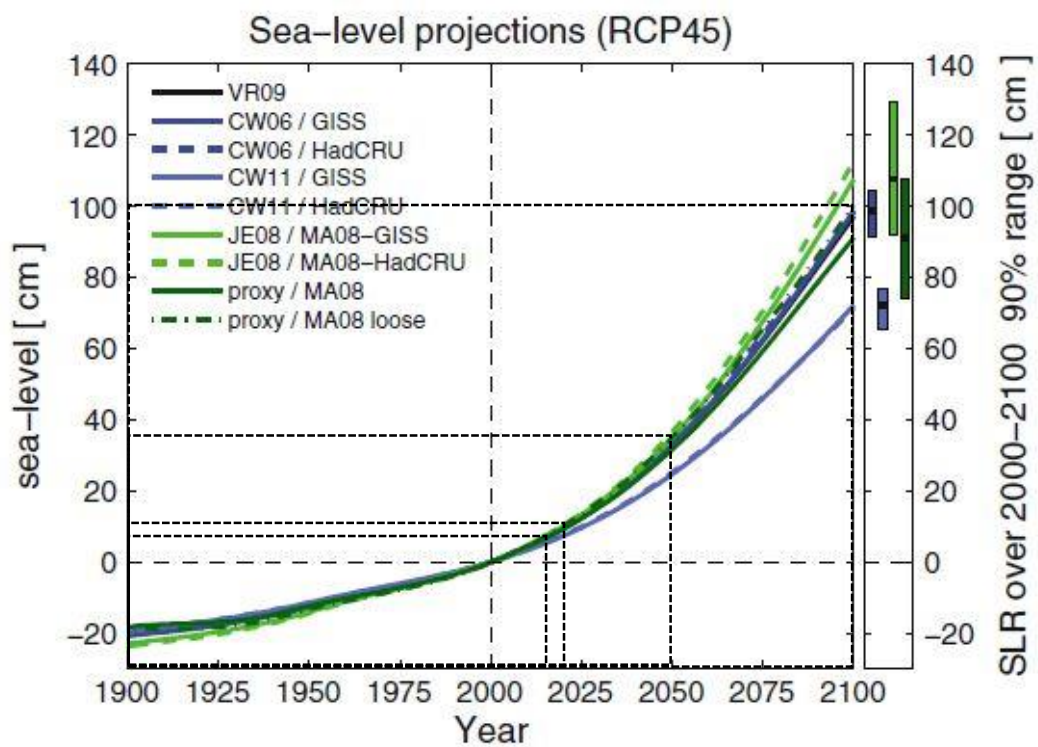
Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, (2009) – Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Van der Meer, J.W., (1988) – Rock slopes and gravel beaches under wave attack. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Vidal, C., Losada, M.A., E.P.D., 1995. Suitable Wave Height Parameter for Characterizing Breakwater Stability. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 121 (2), 88-97.

Van Koningsveld, M; Davidson, M.A., and Huntley, D.A., (2005) – Matching science with coastal management needs: the search for appropriate coastal state indicators. Journal of Coastal Research, 21(3), 399–411. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

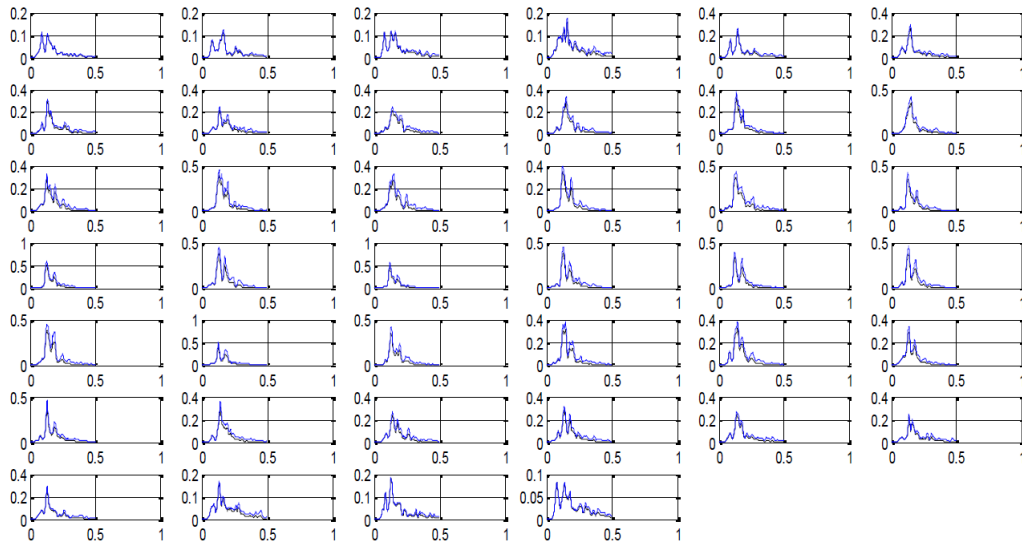
8. Anexos

8.1 Anexo A

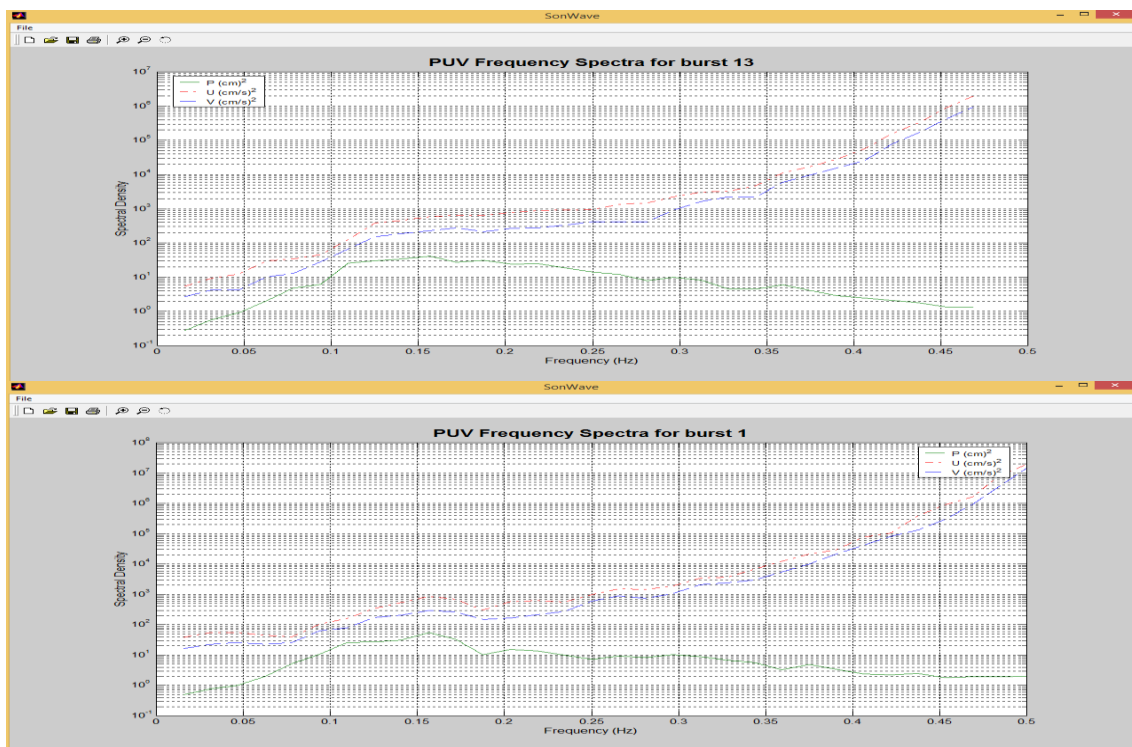


Anexo 1 – Projeções da subida do nível do mar por diferentes modelos calibrados com diferentes dados de temperatura e nível do mar. A barra lateral direita indica intervalos de confiança de 90% (percentil 5-95, usando o GISS temperature dataset); (Rahmstorf 2012).

8.2 Anexo B



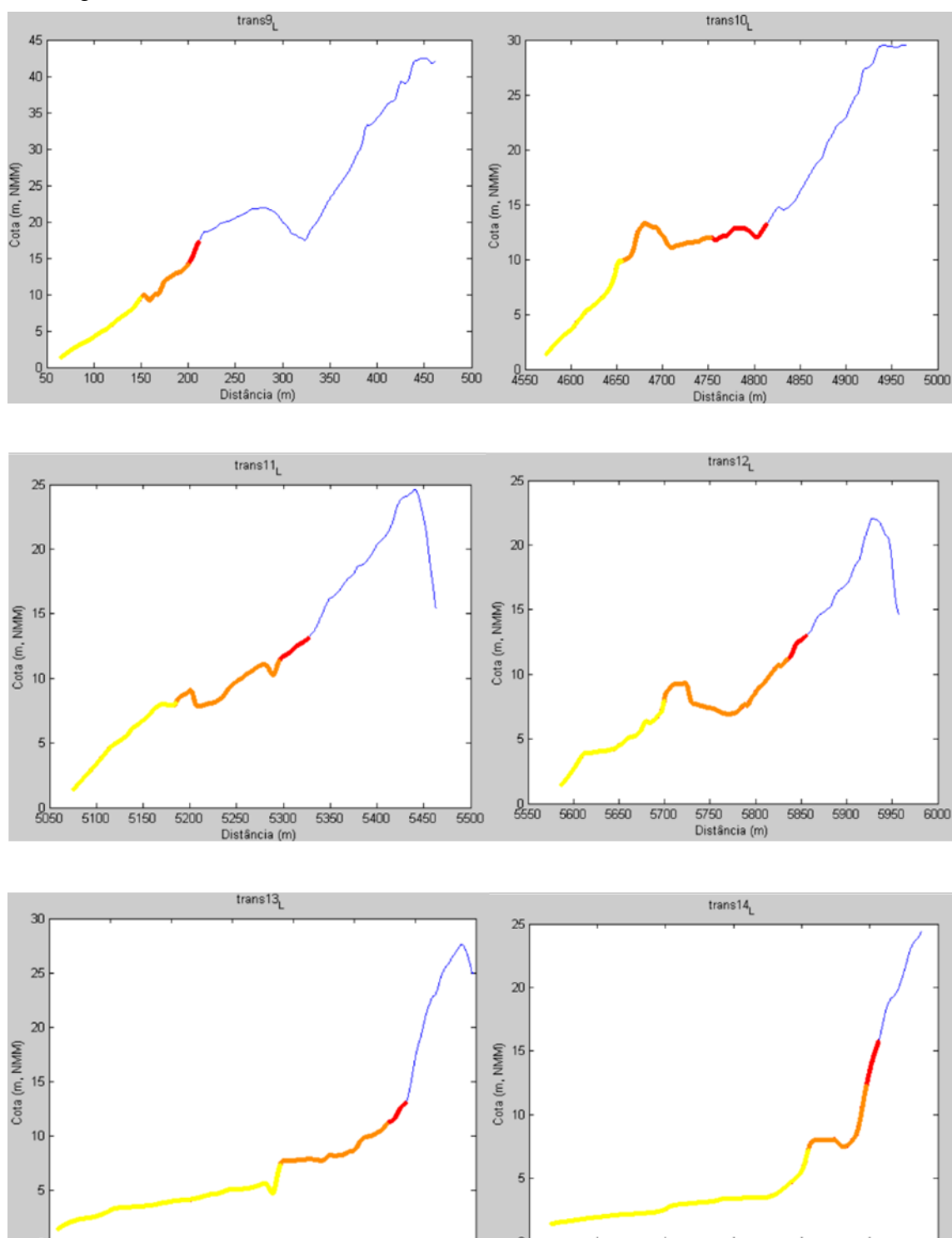
Anexo 2 – Análise espectral do sinal do PT_70. No eixo do xx está representada a frequência (Hz) e no eixo dos yy a densidade de energia (m^2/Hz).



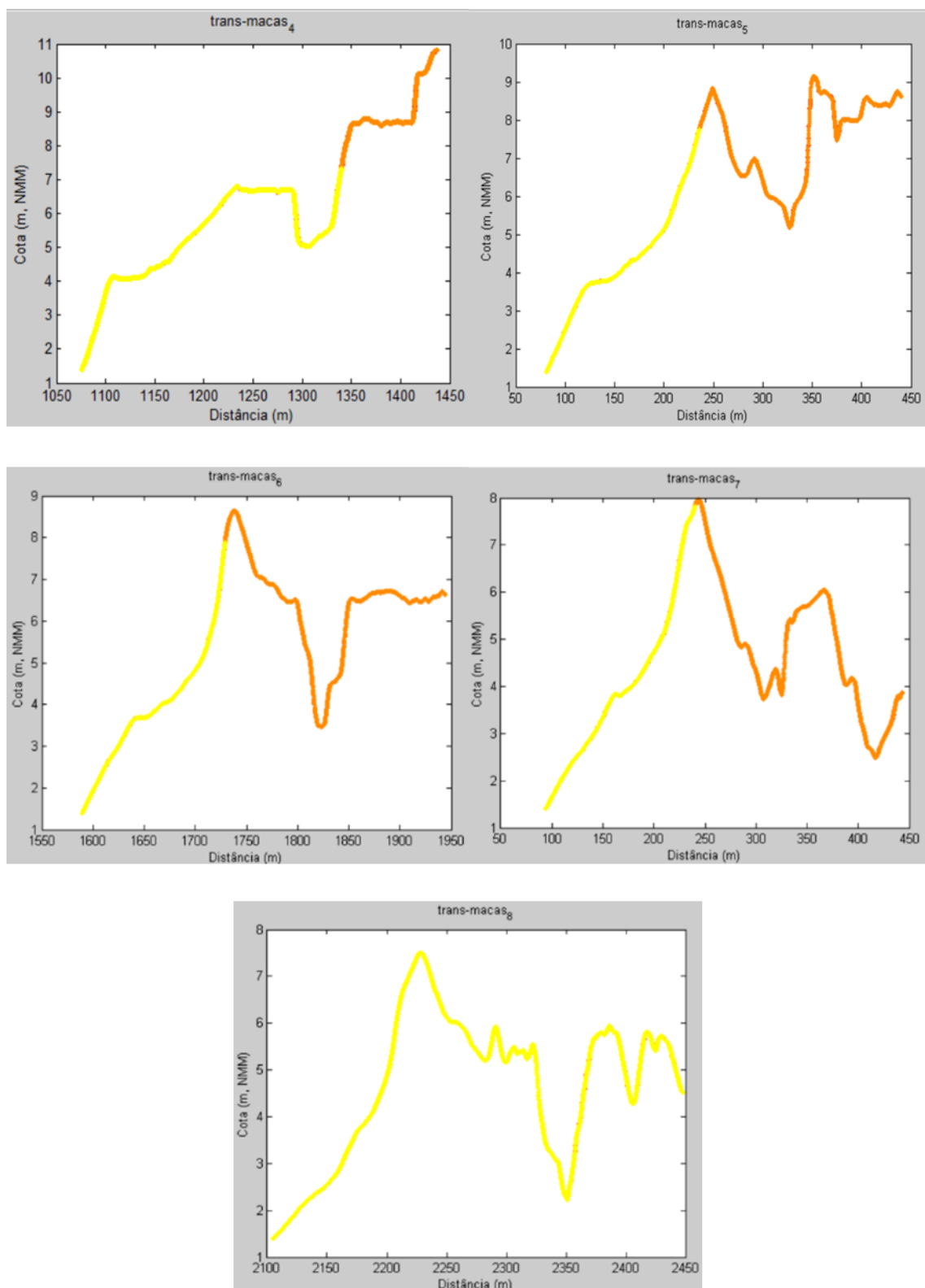
Anexo 3 – Análise espectral do mini-ADP às 16:15h e 16:45h na praia Grande.

8.3 Anexo C

Note-se que as distâncias nos gráficos não começam no valor 0, mas a distância para a cartografia foi confirmada no MATLAB e ArcGIS.



Anexo 4 – Determinação do alcance máximo dos espreios nos perfis traçados na praia da Foz do Lizandro.



Anexo 5 – Determinação do alcance máximo dos espraços nos perfis traçados na praia das maçãs.